Guia do Usuário

STR

Seleção de Técnicas de Remediação

Autores

Eng. Dr. André Moreira de Souza Filho
PETROBRAS/CENPES

Eng. Dr. Marcio R. Schneider
UFSC/REMA

Eng. Dr. Admir José Giachini
UFSC/REMA

Eng.ª Eduarda Gabriele R. Rudek
UFSC/REMA

Eng.ª Dra. Ana Claudia Canalli Bortolassi
UFSC/REMA

Eng. Gusttav Bauermann Lang
UFSC/REMA

Bel. Vanderval Borges de Souza Junior
UFSC/REMA

Organizadoras: **Bolsistas de Inovação Tecnológica**

Amanda Rafaella Campos | Giovanna Viana Pitoli | Isabelle França
Julia Viel Vitali | Letícia Marianne Costa | Mayara Dargas Sousa

PETROBRAS | anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis | UFSC | rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE | Atena Editora

Ano 2024

Guia do Usuário

STR

Seleção de Técnicas de Remediação

Autores

Eng. Dr. André Moreira de Souza Filho
PETROBRAS/CENPES

Eng. Dr. Marcio R. Schneider
UFSC/REMA

Eng. Dr. Admir José Giachini
UFSC/REMA

Eng.ª Eduarda Gabriele R. Rudek
UFSC/REMA

Eng.ª Dra. Ana Claudia Canalli Bortolassi
UFSC/REMA

Eng. Gusttav Bauermann Lang
UFSC/REMA

Bel. Vanderval Borges de Souza Junior
UFSC/REMA

Organizadoras: **Bolsistas de Inovação Tecnológica**

Amanda Rafaella Campos | Giovanna Viana Pitoli | Isabelle França
Julia Viel Vitali | Letícia Marianne Costa | Mayara Dargas Sousa

PETROBRAS | anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis | UFSC | rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE | Atena Editora

Ano 2024

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Ellen Andressa Kubisty
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
Thamires Camili Gayde
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Guia do usuário
STR - Seleção de técnicas de remediação

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Jeniffer dos Santos
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G943 Guia do usuário STR - Seleção de técnicas de remediação / Organizadoras Amanda Rafaella Campos, Giovanna Viana Pitoli, Isabelle França, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.

Outras organizadoras:
Julia Viel Vitali
Letícia Marianne Costa
Mayara Dargas Sousa

Autores:
André Moreira de Souza Filho
Marcio Roberto Schneider
Admir José Giachini
Eduarda Gabriele Ramser Rudek
Ana Claudia Canalli Bortolassi
Gusttav Bauermann Lang
Vanderval Borges de Souza Junior

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-2929-6
DOI https://doi.org/10.22533/at.ed.296242012

1. Engenharia de Software. I. Campos, Amanda Rafaella (Organizadora). II. Pitoli, Giovanna Viana (Organizadora). III. França, Isabelle (Organizadora). IV. Título.

CDD 005.2

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Para fins desta declaração, o termo 'autor' será utilizado de forma neutra, sem distinção de gênero ou número, salvo indicação em contrário. Da mesma forma, o termo 'obra' refere-se a qualquer versão ou formato da criação literária, incluindo, mas não se limitando a artigos, e-books, conteúdos on-line, acesso aberto, impressos e/ou comercializados, independentemente do número de títulos ou volumes. O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação à obra publicada; 2. Declara que participou ativamente da elaboração da obra, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final da obra para submissão; 3. Certifica que a obra publicada está completamente isenta de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

AGRADECIMENTOS

Queremos registrar aqui nossos mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para tornar este projeto realidade. O sucesso deste livro deve-se inteiramente à colaboração, ao apoio e à dedicação de pessoas que foram essenciais para sua realização.

Ao Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil (in memoriam), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que iniciou os primeiros estudos sobre a contaminação de solos e águas subterrâneas e contribuiu muito com os avanços tecnológicos na área.

Ao corpo gerencial e técnico da Petrobras, André Bueno Portes, Bruno Pereira Faria, Camila Tolledo Santos, Flavia Goncalves de Castro, Flavio Barbosa Bezerra, Marco Antonio Batista da Silva, Ricardo Schutz, Rodrigo Augusto Marques, Adriana Ururahy Soriano, Deivid Lucas dos Santos Migueleti, Leonardo Mitidiero Mansor, Leonardo Vieira Gomes da Silva, Luiz Fernando Martins, Marcelo Bizzoni, Marcus Paulus Martins Baessa e Tiago Magalhaes Soares, pelo apoio ao desenvolvimento e aplicação do software SUITE. Além disso, por compartilhar conhecimento e dados relevantes utilizados na simulação dos estudos de caso.

À Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pelo apoio à pesquisa científica e incentivo à aplicação de tecnologias de inovação na indústria de petróleo, gás natural e combustível.

Aos pesquisadores, professores, técnicos e bolsistas de inovação tecnológica do Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente (REMA), em especial ao Prof. Dr. Admir José Giachini (Coordenador do Projeto) e às colaboradoras Amanda Rafaella Campos, Giovanna Viana Pitoli, Isabelle França, Julia Viel Vitali, Letícia Marianne Costa e Mayara Dargas Sousa, que se dedicaram a esse projeto.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

O problema ocasionado por vazamentos acidentais de petróleo, derivados e biocombustíveis em ambientes terrestres (*onshore*) acarreta em impactos ambientais e à saúde humana. Uma das principais limitações para o encerramento desses casos é a permanência de hidrocarbonetos de petróleo no solo e em aquíferos, presentes como substância imiscível menos densa que a água (LNAPL – *Light Nonaqueous Phase Liquid*). Além dos impactos, há ainda o gasto de milhões de reais por ano correspondentes a multas ambientais, contenciosos jurídicos e ações de gerenciamento das áreas contaminadas a fim de mitigar os danos provocados pelos vazamentos. De senso comum, o LNAPL é percebido como uma ameaça ambiental devido aos potenciais riscos de explosão, toxicidade, mobilidade e possibilidade de geração de plumas de contaminação.

A recuperação do LNAPL em áreas contaminadas necessita de experiência e conhecimento técnico na elaboração e execução dos projetos de remediação. Comparando com eventos de explotação de petróleo em áreas de produção onde, menos de 40% do óleo presente no reservatório é explotado, a eficiência da recuperação do LNAPL em áreas contaminadas também é baixa. A alta complexidade do comportamento do LNAPL no solo e a ausência de modelos matemáticos integrados de apoio à tomada de decisão têm levado à compreensão inadequada dos cenários de contaminação, resultando na adoção de estratégias de remediação ineficazes e inadequadas, gerando custos que poderiam ser evitados.

Nesse contexto, o software STR (Seleção de Técnicas de Remediação) foi desenvolvido objetivando auxiliar especialistas em remediação na adoção de abordagens estratégicas de remediação adaptativas, adequadas às especificidades do produto derramado (petróleo e derivados) e às características de cada local, promovendo a eficácia dos processos de gerenciamento de áreas contaminadas. De modo geral, o STR visa relacionar critérios técnicos e de aplicabilidade para a área contaminada, como características geológicas e hidrogeológicas, fontes de contaminação, riscos e metas de remediação, com critérios qualitativos, incluindo segurança, gestão de resíduos, custo e tempo de aplicação. Integrando tais fatores, o software auxilia na definição de técnicas mais assertivas em função das especificidades de cada área de interesse, com direcionamento ao encerramento do caso.

O STR permite realizar o encadeamento de técnicas de remediação visto que para o encerramento do caso, os projetos de remediação devem prever o sequenciamento ou combinação das tecnologias para os diferentes estágios do ciclo de vida da remediação, com base nos objetivos globais da remediação. Assim, o software pode ser empregado para avaliar o uso de múltiplas tecnologias, por meio de um planejamento mais cuidadoso e amplo, considerando a evolução do cenário de contaminação em cada mudança de estratégia de remediação e, consequentemente, do modelo conceitual.

1.1 O que é o STR?

O STR é um simulador que busca sistematizar a seleção da(s) técnica(s) de remediação aplicáveis a uma determinada área com base em critérios científicos, equilibrando eficiência, custos e critérios ambientais. O software integra as informações do modelo conceitual de cada área contaminada, considerando sua geologia, hidrogeologia, fontes de contaminação, riscos e metas de remediação para definição da técnica mais assertiva em função das especificidades de cada área de interesse, com direcionamento ao encerramento do caso. Para tanto, o STR possui um banco de dados das técnicas de remediação mais utilizadas para tratamento da fonte de contaminação e fase dissolvida, compilando critérios referentes às suas aplicabilidades. Assim, para utilização do STR é necessário o conhecimento das características do modelo conceitual da área de interesse, sendo recomendado que já tenha sido realizada a etapa de investigação detalhada do gerenciamento de áreas contaminadas.

1.2 Funcionalidade do STR

As principais funcionalidades do STR incluem:

- Seleção e classificação das técnicas de remediação aplicáveis, equilibrando eficiência, custos, critérios ambientais e o modelo conceitual da área;
- Apresentação das técnicas de remediação não aplicáveis e as razões que fundamentaram esta conclusão;
- Permite a atribuição de pesos a critérios qualitativos, como segurança, custos, tempo de aplicação da técnica, entre outros;
- Avaliação do encadeamento de técnicas de remediação em função dos objetivos de remediação e fases do LNAPL; e
- Geração do relatório final com os dados inseridos e resultados da classificação das técnicas.

1.3 Requisitos mínimos do sistema

- Windows 10
- 8GB de RAM (mínimo), 16GB (recomendado)
- Intel Core i3 (mínimo), Intel Core i7 (recomendado)
- Processador Gráfico: 1024x768 (mínimo), Full HD (recomendado)

2 UTILIZAÇÃO DO STR

2.1 Inicialização do SUITE e seleção do banco de dados

Após clicar duas vezes no ícone de inicialização do software SUITE, uma janela é apresentada, conforme a Figura 2.1. Estão disponíveis as opções “Carregar banco de dados existente” ou criar um “Novo banco de dados”. Caso seja a primeira vez utilizando o SUITE, o usuário deve selecionar a opção “Novo banco de dados”. Após, uma janela será apresentada para escolha do local onde o banco de dados será salvo. Ao selecionar a pasta desejada, clicar em “Salvar” para criar um arquivo de extensão “*.db*”.

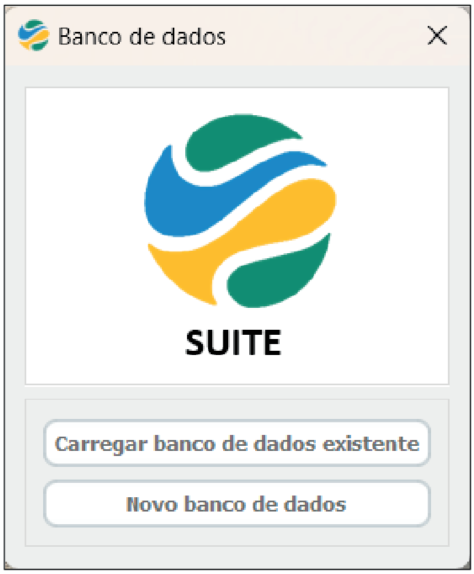


Figura 2.1. Seleção do banco de dados.

O arquivo *.db* é responsável por armazenar todas as informações referentes às simulações realizadas, incluindo dados dos solos e produtos utilizados. Esse arquivo pode ser compartilhado, conforme mais detalhes apresentados no Item 3.1. Após criar e salvar o arquivo *.db*, uma mensagem é apresentada na tela (Figura 2.2).

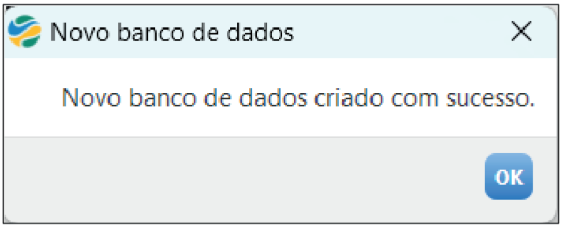


Figura 2.2. Novo banco de dados criado com sucesso.

Ao criar o banco de dados, o usuário pode selecionar a inserção de valores padrão para o novo banco de dados, visando adicionar informações básicas de solos e produtos conhecidos pela literatura, conforme a Figura 2.3.

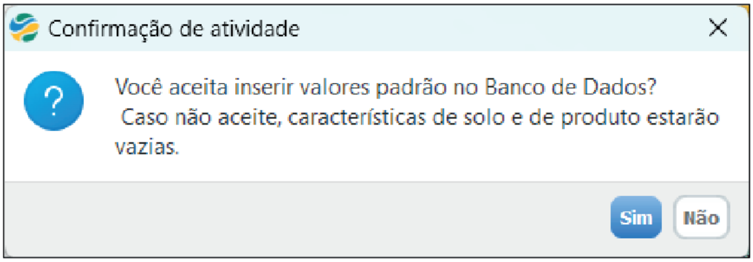


Figura 2.3. Inserir valores padrão no banco de dados.

Caso o usuário já tenha criado um banco de dados previamente ou deseje utilizar um banco de dados fornecido, basta selecionar a opção “Carregar Banco de dados existente” (Figura 2.1). Uma janela será apresentada para seleção do arquivo *.db*. Se o banco de dados for carregado corretamente, uma mensagem será apresentada na tela (Figura 2.4).

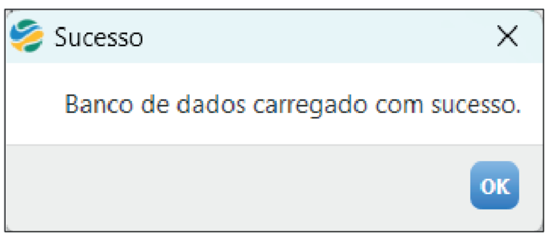


Figura 2.4. Banco de dados carregado com sucesso.

Para mais informações sobre como os projetos são salvos no banco de dados e como compartilhá-los, consulte o Item 3.1. A seleção do banco de dados é um procedimento padrão, que sempre deve ser realizado ao inicializar o SUITE.

2.2 Nova Simulação

Para iniciar uma nova simulação, o usuário deve selecionar o ícone “Seleção de Técnicas de Remediação – STR” na tela inicial (Figura 2.5). Ou então, clicar no ícone “Novo”, localizado abaixo do menu “Arquivo” na aba superior (Figura 2.5). Também é possível iniciar uma nova simulação selecionando “Arquivo Novo”, como indicado na Figura 2.6. O menu “Arquivo” possui outros comandos, como abrir uma simulação já realizada e salvar as mudanças efetuadas durante o processo.

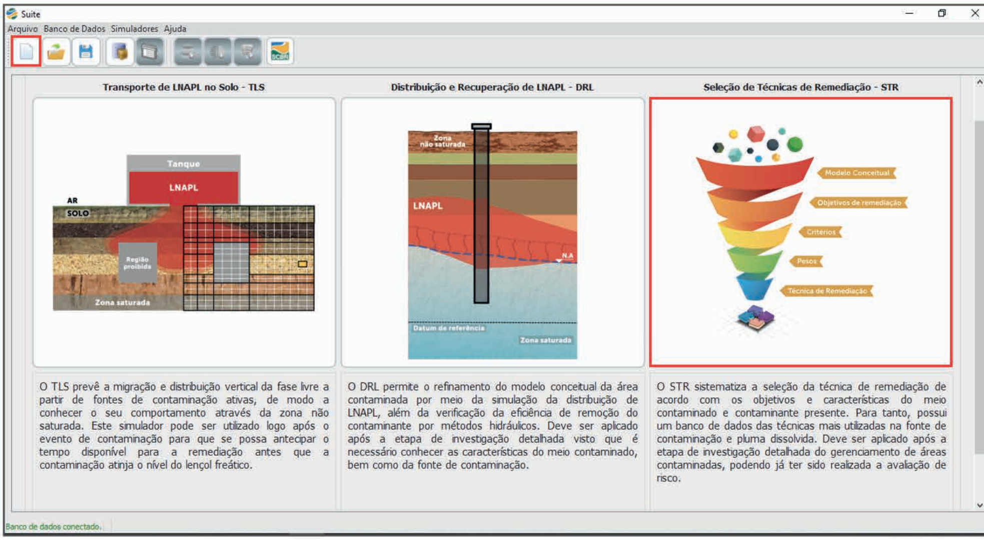


Figura 2.5. Área de trabalho inicial do SUITE de simuladores.

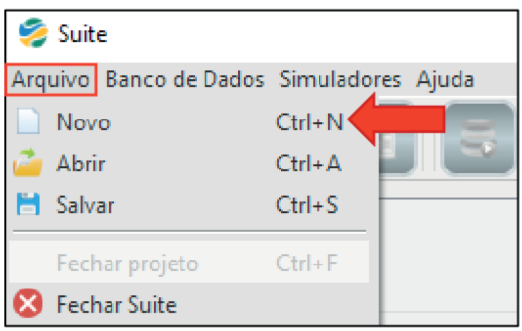


Figura 2.6. Criar novo projeto pela barra de menus.

Ao selecionar uma dessas opções, uma nova janela é aberta, permitindo a seleção de um dos três simuladores que compõem o SUITE. Para criar um novo projeto, basta selecionar a opção “STR” e clicar em “Criar”, conforme indicado na Figura 2.7. A interface inicial do STR é apresentada na Figura 2.8.

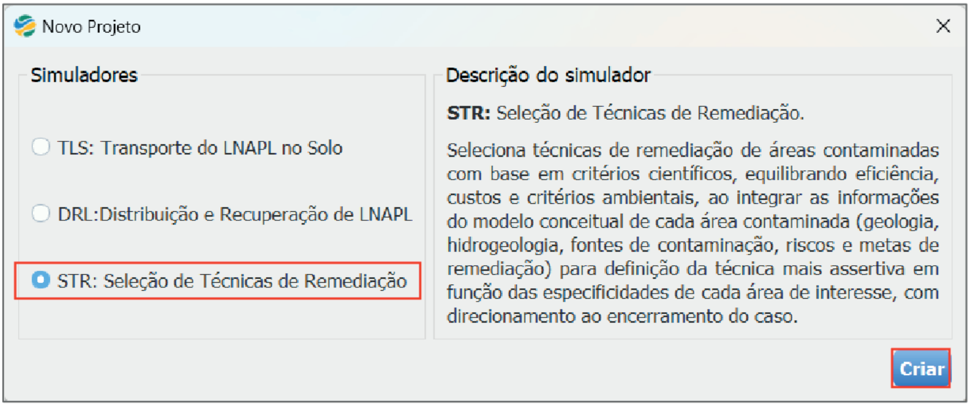


Figura 2.7. Criando um novo projeto no STR.

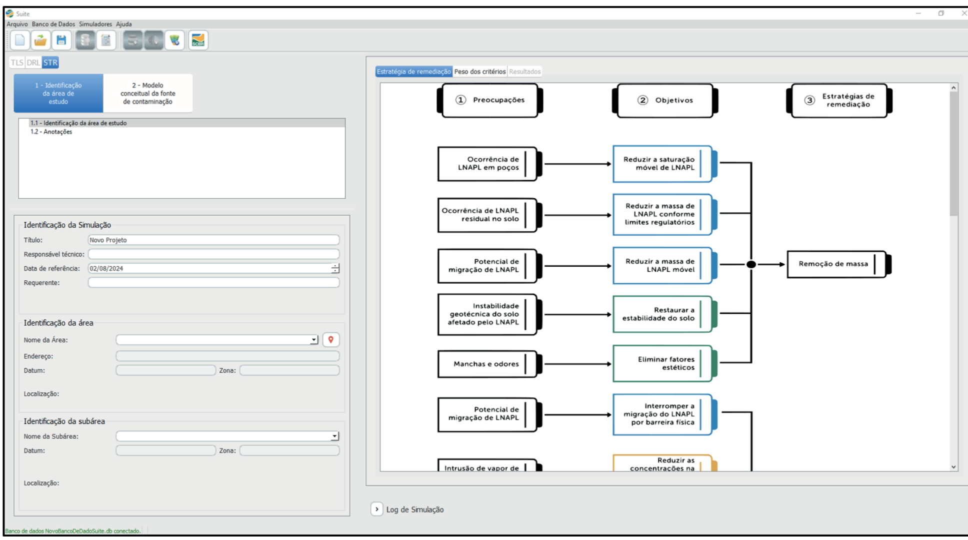


Figura 2.8. Interface inicial do STR.

Para abrir uma simulação salva anteriormente, o usuário deve clicar no ícone “Abrir”, abaixo do menu “Arquivo”, como indicado na Figura 2.9. Ou então, basta ir em “Arquivo → Abrir” como indicado na Figura 2.10.

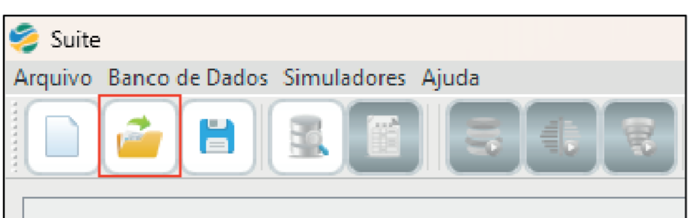


Figura 2.9. Ícone para abrir um projeto.

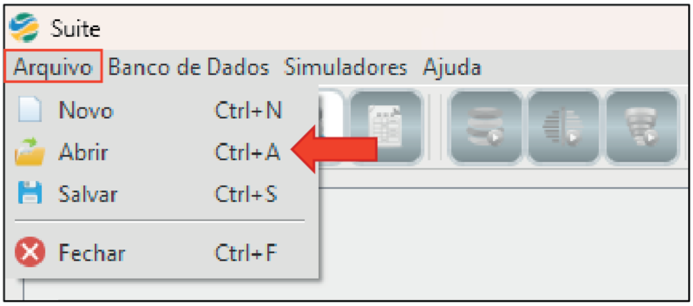


Figura 2.10. Abrir projeto pela barra de menus.

Ao selecionar uma dessas opções, é possível visualizar todos os projetos salvos no SUITE. Para abrir um projeto no STR, basta selecionar o projeto de interesse e clicar em "Abrir", conforme indicado na Figura 2.11.

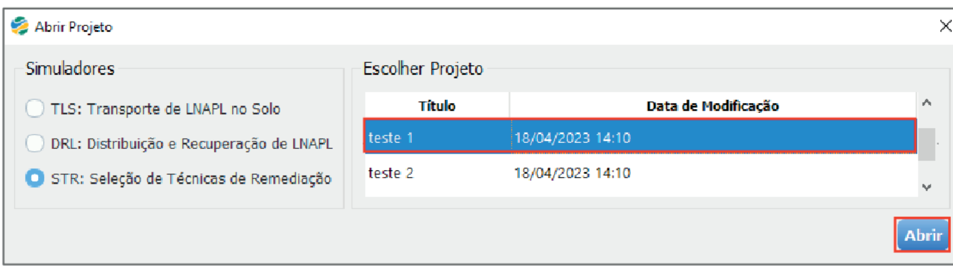


Figura 2.11. Abrir um projeto já salvo no SUITE.

2.3 Banco de dados

O STR conta com um banco de dados composto por 22 técnicas de remediação. Nele, estão agrupadas características que determinam a aplicabilidade técnica das tecnologias de remediação em função do modelo conceitual inserido pelo usuário. O banco de dados contempla critérios qualitativos, como segurança, gestão de resíduos, preocupações da comunidade, entre outros, que servem para classificar a técnica com base na importância atribuída a cada critério pelo usuário. O banco de dados padrão do software foi baseado em dados disponibilizados pelo *Interstate Technology and Regulatory Council* (ITRC), *Federal Remediation Technologies Roundtable* (FRTR), *Government of Canada* e experiência técnica do Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente (REMA). Portanto, as informações contidas no banco de dados seguem conceitos gerais a respeito das técnicas de remediação que foram avaliados de acordo com as referências técnicas disponíveis.

2.3.1 Técnicas de remediação disponíveis

As tecnologias de remediação disponíveis no STR são descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Descrição das técnicas de remediação disponíveis no STR

Técnica de remediação	Descrição
Escavação e destinação final	O corpo do LNAPL é removido fisicamente e devidamente tratado e descartado. A técnica realiza remoção e/ou redução de todas as fases, incluindo LNAPL em fase livre, adsorvida, dissolvida e vapor.
Escavação da zona saturada e destinação final	Assim como a técnica anterior, o corpo do LNAPL é fisicamente removido e adequadamente tratado e descartado, sendo uma técnica que abrange remoção e/ou redução de todas as fases. Entretanto, a escavação na zona saturada pode ser realizada apenas em condições específicas, como o tipo de solo, que deve ser silte-argiloso. Não é possível realizar a escavação em um solo arenoso, pois este tipo de solo não possui consistência suficiente para ser escavado na zona saturada.
Skimming	O LNAPL em fase livre é o único fluido removido, sendo utilizada uma bomba ou algum equipamento mecanizado contínuo similar. Pode haver recuperação ocasional de pequenos volumes de água.
Bombeamento e Tratamento (P&T)	Essa técnica recupera a água contaminada e/ou fase livre do LNAPL, além de tratá-la e descartá-la adequadamente, controlando a fonte de contaminação através da interceptação e captura da fase dissolvida na zona saturada. Assim, a pluma dissolvida abaixo do gradiente hidráulico é separada e a captura dos contaminantes na área farão com que a mesma diminua. É uma tecnologia de remoção de massa, sendo utilizada também para controlar a migração da pluma de contaminantes.
Extração Multifásica (MPE)	O LNAPL, a água e o vapor são os fluidos removidos. O rebaixamento do LNAPL, rebaixamento do nível d'água e o vácuo induzem o gradiente do LNAPL em direção ao poço de extração. O rebaixamento do nível d'água facilita a recuperação do LNAPL, aumentando a taxa de recuperação. O MPE apresenta duas configurações, sendo elas a *single pump* (bomba única) e *dual-pump* (duas bombas). A tecnologia realiza a mudança de fase do LNAPL com a volatilização e biodegradação aeróbia, além de possibilitar o controle hidráulico do LNAPL e remoção de massa como estratégia secundária de remediação.
Injeção de surfactante (*soil flushing*)	Um surfactante é injetado a fim de reduzir a tensão superficial e aumentar a solubilidade do LNAPL. O LNAPL e a água são removidos hidraulicamente.
Injeção de cossolvente (*soil flushing*)	Um solvente é injetado com a função de aumentar a solubilidade e mobilidade do LNAPL. Nessa tecnologia, a água e o LNAPL são removidos hidraulicamente.
Injeção de vapor	O LNAPL é removido a partir da entrada forçada de vapor no aquífero a fim de vaporizar e solubilizar o LNAPL, aumentando sua recuperação a partir da redução de sua viscosidade e tensão superficial e aumento de seu gradiente. Vapores, água subterrânea e LNAPL são removidos por extração de vapores e recuperação hidráulica.
Aquecimento por condução térmica	O solo é aquecido a partir de elementos de aquecimento a fim de vaporizar e solubilizar o LNAPL, aumentando sua recuperação a partir da redução de sua viscosidade e tensão superficial. Vapores, água subterrânea e LNAPL são removidos por extração de vapores e recuperação hidráulica.
Aquecimento por resistência elétrica	A corrente elétrica é utilizada para aquecer o solo e a água subterrânea através de eletrodos localizados na subsuperfície a fim de vaporizar e solubilizar o LNAPL, aumentando sua recuperação a partir da redução de sua viscosidade e tensão superficial. Vapores, água subterrânea e LNAPL são removidos por extração de vapores e recuperação hidráulica.

Técnica de remediação	Descrição
Extração de vapores do solo (SVE)	Essa técnica induz um vácuo que volatiliza o LNAPL presente acima do lençol freático e remove os vapores de LNAPL do subsolo. Os sistemas de tratamento de vapor normalmente utilizados com SVE incluem carvão ativado granular, oxidação térmica ou catalítica, compressão/ condensação ou motor de combustão interna.
Injeção de ar e extração de vapores do solo (AS/ SVE)	O ar é injetado (em inglês, *air sparging* – AS) na zona saturada para solubilizar, biodegradar e volatilizar os constituintes do LNAPL. Já a extração de vapores do solo (em inglês, *soil vapor extraction* – SVE) também promove a biodegradação aeróbia e volatilização dos componentes do LNAPL na zona vadosa e extrai os vapores gerados pela AS. Ambas as técnicas podem ser usadas individualmente, caso as condições sejam apropriadas. Uma parte significativa da depleção do LNAPL é realizada pela AS/SVE devido ao aumento da biodegradação aeróbia.
Bioventilação/ *Biosparging*	Ocorre de maneira similar à AS/SVE, porém na bioventilação o ar é injetado mais lentamente com o objetivo de estimular a degradação biológica aeróbia do LNAPL na zona não saturada. Já o *biosparging* faz a injeção direta de ar ou oxigênio puro em poços de injeção instalados abaixo da zona contaminada (zona saturada). Várias configurações são possíveis, incluindo fluxo de ar na zona não saturada por SVE.
Oxidação química	O LNAPL é remediado através de uma maior solubilização e destruição química a partir da adição de oxidantes químicos na zona do LNAPL (ex. peróxido de hidrogênio e persulfato). A oxidação química normalmente requer adição de catalizadores, estabilizadores e/ou ativadores para controlar as taxas de oxidação. As reações de oxidação com LNAPL podem ser vigorosas e necessitar de controle dos gases de escape.
Bioestimulação aeróbia	É o processo em que os microrganismos específicos são estimulados utilizando o oxigênio (natural ou adicionado) como receptor de elétrons e os contaminantes como fonte de carbono na respiração aeróbia. Os contaminantes são convertidos em dióxido de carbono, água e massa celular microbiana, tendo reduzidos sua massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentração no solo e água subterrânea. É uma tecnologia de mudança de fase/ composição, atuando na remoção de massa como estratégia de remediação secundária.
Bioestimulação anaeróbia	Envolve o fornecimento de aceptores de elétrons, que não sejam oxigênio (ex. nitrato e sulfato). A técnica pode também ser realizada através do aumento da temperatura subsuperficial a fim de aumentar as taxas de biodegradação natural.
Depleção Natural da Zona da Fonte (NSZD)	O LNAPL é degradado naturalmente através dos processos de volatilização, dissolução e biodegradação, sendo este o processo predominante. Tais processos contribuem, em condições favoráveis, para reduzir a concentração, mobilidade e toxicidade do contaminante. De modo geral, a técnica se concentra no monitoramento e avaliação desses processos, além do acompanhamento das concentrações de subprodutos gerados, como metano, CO_2, oxigênio dissolvido, sulfato, nitrato e ferro.
Biobarreiras	As biobarreiras atuam através de processos biológicos, sendo instaladas na trajetória de fluxo de uma pluma na água subterrânea contaminada, de modo que a pluma é interceptada e os contaminantes são biodegradados. Os contaminantes são utilizados como fonte de carbono e de energia pela densa população microbiana estabelecida no meio. É uma técnica de controle de massa e tratamento da fase dissolvida, atuando também na mudança de fase.

Técnica de remediação	Descrição
Fitorremediação	Utiliza plantas para remediar ou conter contaminantes no solo, água subterrânea e superficial, e sedimentos. É considerada comumente uma tecnologia de mudança de fase, aumentando a biodegradação subsuperficial, além de ser considerada uma tecnologia de remoção de massa e de controle de massa, caso seja designada para controle hidráulico.
Contenção física ou hidráulica	As barreiras subsuperficiais (ex. estacas, parede de lama, extração de água subterrânea, trincheiras e barreira absorvente permeável) são construídas para prevenir, impedir ou desviar o LNAPL. É uma tecnologia de controle de massa e não reduz significativamente a massa do LNAPL.
Revolvimento do solo	O LNAPL é imobilizado, reduzindo a permeabilidade da zona do LNAPL através da mistura de aditivos *in situ* (ex. adição de argila bentonita ou cimento). A tecnologia reduz a mobilidade do LNAPL, além de reduzir a lixiviabilidade e volatilidade dos seus constituintes.
Atenuação Natural Monitorada (ANM)	Consiste no monitoramento de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem naturalmente no meio, como biodegradação, sorção, dispersão e volatilização, sendo a biodegradação um dos componentes mais importantes da técnica. Esses processos atenuam as concentrações de contaminantes dissolvidos nas águas subterrâneas, reduzindo sua massa e toxicidade, sem intervenção humana.

Fonte: Adaptado de ITRC (2018).

2.3.2 Critérios de avaliação

O STR conta com oito critérios de avaliação que devem ser considerados e elencados de acordo com a relevância na seleção da técnica de remediação. Os critérios são utilizados para classificar as tecnologias que foram selecionadas, a partir da estratégia de remediação e modelo conceitual inserido pelo usuário. Sendo assim, o usuário deve classificar os critérios com base na sua importância para uma determinada situação (para mais informações, consulte o Item 2.5). A definição e considerações adicionais de cada critério são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Definição dos critérios de avaliação para classificação das tecnologias

Critério de avaliação	Descrição	Considerações
Segurança	Corresponde a questões de segurança em um determinado local, que possam representar um desafio específico para uma tecnologia. Pressupõe-se que todas as atividades de construção estarão de acordo com os requisitos de saúde e segurança e que a operação do sistema estará dentro dos regulamentos aplicáveis. Além disso, pressupõe-se que qualquer tecnologia possui problemas inerentes relacionados à segurança. Entretanto, algumas tecnologias podem envolver a adição de eletricidade, calor ou produtos químicos que podem representar um risco operacional específico se aplicados em grande escala no terreno ou na proximidade de trabalhadores ou do público.	• Em instalações de acesso público e não restrito pode ser mais difícil gerir determinada técnica de forma segura; • As questões relacionadas às infraestruturas podem ser mais críticas para determinadas tecnologias do que para outras; • Algumas tecnologias podem produzir fluxos de resíduos ou condições que são particularmente difíceis de gerir em um determinado local ou que podem evoluir rapidamente para um estado crítico.
Gestão de resíduos	Nível de esforço necessário para gerir qualquer fluxo de resíduos resultante da remediação.	• Resíduos mais volumosos representam um maior desafio para a eliminação/tratamento; • O tempo necessário para obtenção de autorizações influencia o tempo para que uma tecnologia possa ser implantada; • Os fluxos de resíduos gerados podem ser mais tóxicos ou mais difíceis de controlar do que o LNAPL da área.
Preocupações da comunidade	São preocupações expressas pela comunidade, proprietários de casas próximas, organizações cívicas ou preocupações que provavelmente serão expressas à medida que a remediação do LNAPL progride.	• A tecnologia representa um risco social específico; • A conclusão da remediação causa mais danos do que benefícios ou torna o local menos apto para uma utilização ativa e produtiva; • A remediação do LNAPL é aplicada em terras públicas, possivelmente controlando o grau de participação pública ou exigindo licenças adicionais; • A remediação não é, ou não é vista como consistente com o uso atual e futuro planejado do solo, reduzindo o valor ou uso da propriedade; • O local onde se encontra o LNAPL está muito próximo de receptores sensíveis.

Critério de avaliação	Descrição	Considerações
Pegada de Carbono / Requisitos de Energia	Utilização e disponibilidade de recursos (ex. energia e água) e geração de resíduos (quantidade, toxicidade e tratamento/eliminação).	• O consumo de energia ou os resíduos gerados são desproporcionais em relação a outras tecnologias; • Uma fonte de energia não está disponível de forma eficaz ou em quantidade suficiente para alimentar a técnica de remediação conforme requerido; • Estão disponíveis fontes naturais de energia passiva (solar e eólica) que podem alimentar a tecnologia de forma adequada.
Restrições do local	Obstáculos físicos, logísticos ou legais à instalação do sistema no local (ex. localização de edifícios, áreas de tráfego intenso, propriedades pequenas, regulamentos em relação a ruídos, geologia do local [ex. profundidade até a camada rochosa, profundidade até a água subterrânea], ou receptores sensíveis nas proximidades, como escolas, creches, hospitais etc.).	• Restrições nas limitações do local impactam na implementação de algumas tecnologias mais do que outras, devido ao tamanho do equipamento, grau de perturbação da superfície etc; • Em locais com mais restrições físicas, logísticas ou legais, as tecnologias fisicamente maiores podem ser menos viáveis de implementar.
Outros regulamentos	Algumas tecnologias requerem permissões específicas para serem implantadas (ex. controle de injeção subterrânea, gestão de resíduos, controle de emissões atmosféricas ou conformidade com normas aplicáveis).	• Quanto maior for o grau de permissões requeridas para a implementação da tecnologia, mais altos serão os custos e mais prováveis serão os atrasos de implantação do sistema.
Custos	Valor monetário de despesas com fornecimentos, serviços, mão de obra, produtos, equipamentos e outros itens adquiridos para as fases de implementação e operação.	• Cada tecnologia apresenta custos diferentes, que podem variar dependendo das condições do local, inflação e tempo de remediação.
Tempo de aplicação	Compreende o tempo em que o objetivo de remediação deve ser cumprido. O prazo pode ser um fator de avaliação regulamentar ou não regulamentar. Um projeto de remediação de LNAPL pode ter diferentes prazos para cumprir diferentes metas ou objetivos de remediação do LNAPL.	• Mantendo todas as outras variáveis iguais, quanto mais curto for o prazo, mais agressivo será o esforço necessário, o que frequentemente aumenta os custos; • Para uma determinada tecnologia, o tempo necessário para atingir o objetivo de remediação aumenta conforme a dimensão da massa de LNAPL; • O aumento dos requisitos de autorização para uma tecnologia aumenta o tempo para implementação da mesma; • O aumento de infraestruturas ou barreiras no local geralmente atrasa a implementação da tecnologia devido à necessidade de evitar impactos na infraestrutura e/ou compensar as barreiras.

Fonte: Adaptado de ITRC (2018).

2.4 Área de Trabalho do STR

A área de trabalho do STR está organizada, conforme indicado na Figura 2.12. O STR é formado por duas áreas principais: Área 1 e Área 2. As funcionalidades de ambas são descritas a seguir.

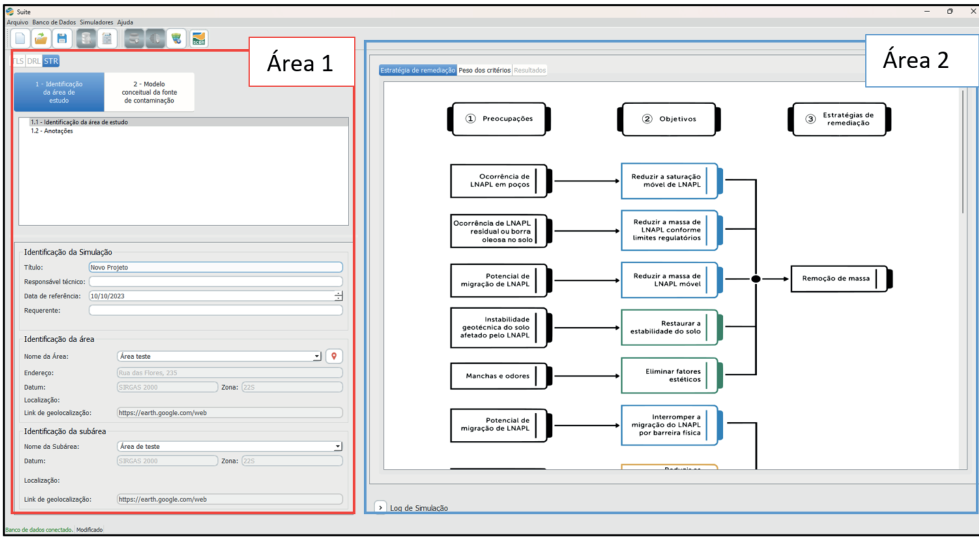


Figura 2.12. Área de trabalho do STR.

- **<u>Área 1</u>**: espaço para inserção dos dados de entrada das etapas da simulação, incluindo a identificação da área de estudo e a definição do modelo conceitual da fonte de contaminação (Figura 2.13).

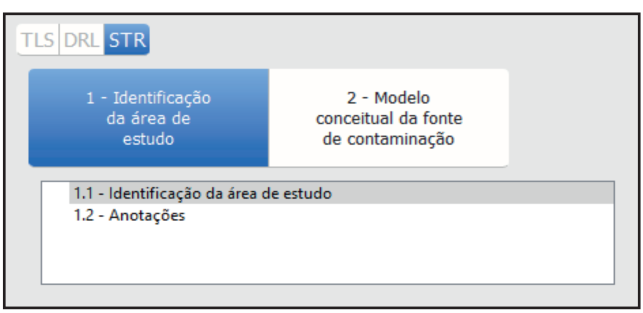


Figura 2.13. Etapas da simulação na Área 1 do STR.

- **Área 2**: onde são apresentados os resultados da simulação e informações auxiliares. Essa região é dividida em três abas: estratégias de remediação, peso dos critérios e os resultados (Figura 2.14).

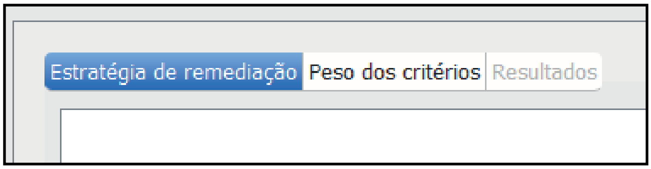


Figura 2.14. Etapas da simulação na Área 2 do STR.

Acima da área de trabalho se encontra a barra de menus e a barra de ícones de atalho, conforme as Figuras 2.15 e 2.16.

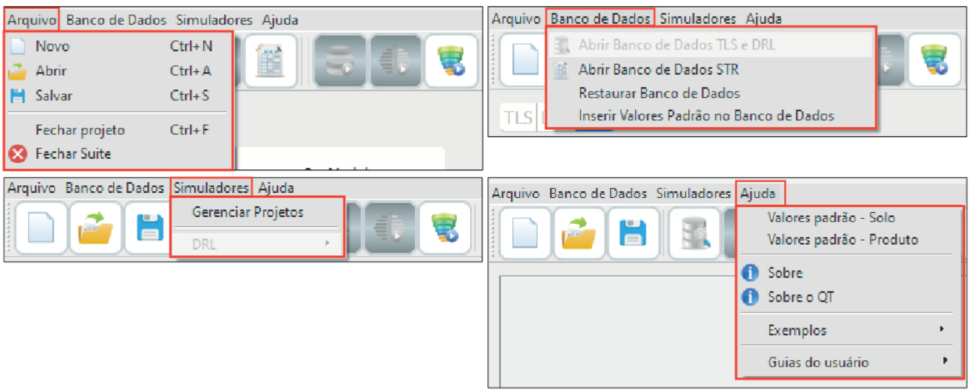


Figura 2.15. Opções da barra de menus.

As principais funcionalidades da barra de menus incluem:

1. "<u>Arquivo</u>":

   a. Novo: cria um novo projeto;

   b. Abrir: abre um projeto existente;

   c. Salvar: salva o projeto atual;

   d. Fechar projeto: fecha o projeto atual e retorna para a interface inicial do SUITE;

   e. Fechar SUITE: fecha o software SUITE.

2. "<u>Banco de Dados</u>":

   a. Abrir Banco de Dados TLS e DRL: abre o banco de dados de solos e produtos cadastrados;

   b. Abrir Banco de Dados STR: abre o banco de dados de técnicas de remediação;

   c. Restaurar Banco de Dados: restaura o banco de dados para a versão inicial;

   d. Inserir Valores Padrão no Banco de Dados: insere os valores de solos e produtos padrão do SUITE.

3. "Simuladores":

a. Gerenciar projetos: permite a exclusão de projetos e/ou edição de informações;

b. DRL: permite exportar os resultados das simulações do DRL.

4. "Ajuda":

a. Valores padrão – Solo: apresenta um documento com informações de valores de referência para solos;

b. Valores padrão – Produto: apresenta um documento com informações de valores de referência para produtos;

c. Sobre: apresenta informações sobre a versão do software e contatos;

d. Sobre o QT: apresenta informações sobre a biblioteca de programação utilizada;

e. Exemplos: dá acesso a exemplos hipotéticos para cada simulador (TLS, DRL e STR);

f. Guias do usuário: dá acesso aos documentos dos guias do usuário de cada software (TLS, DRL e STR).

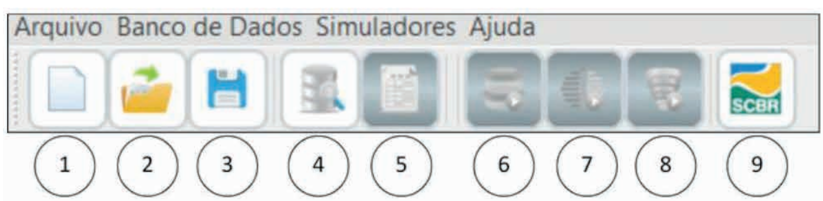


Figura 2.16. Barra de menus e barra de ícones de atalho.

As principais funcionalidades da barra de ícones de atalho são:

1. Novo: cria um novo projeto (TLS, DRL ou STR) em branco para o usuário começar a trabalhar;

2. Abrir: abre um projeto existente (TLS, DRL ou STR), permitindo ao usuário visualizar e editar seu conteúdo;

3. Salvar: salva o projeto atual, gravando as alterações feitas;

4. Editor de Banco de Dados TLS e DRL: abre o Editor de Banco de Dados do TLS e DRL, permitindo a visualização e alteração dos valores de solos, produtos e áreas cadastradas. Esse ícone só fica ativo quando um projeto do TLS ou DRL está em andamento;

5. Banco de Dados STR: abre o Banco de Dados do STR, permitindo a visualização das técnicas de remediação disponíveis e seus parâmetros considerados. Esse ícone só fica ativo quando um projeto do STR está em andamento;

6. Executar TLS: executa a simulação dos dados de entrada informados no TLS e apresenta os resultados simulados;

7. Executar DRL: executa a simulação dos dados de entrada informados no DRL e apresenta os resultados simulados;

8. Executar STR: executa a simulação dos dados de entrada informados no STR e apresenta os resultados simulados;

9. SCBR: inicia a aplicação do software Solução Corretiva Baseada no Risco (SCBR). Para essa função é necessário ter a ferramenta instalada em seu computador e selecionar o caminho que a aplicação se encontra. O caminho padrão é *C:\Program Files (x86)\Petrobras\SCBR 3.25.0*

2.5 Etapas da simulação

O STR apresenta duas etapas principais. A primeira, destacada em verde na Figura 2.17, corresponde à avaliação qualitativa, em que são atribuídos. pesos aos critérios para classificação das técnicas ao final da simulação. A segunda, corresponde à inserção dos dados de entrada referentes à área de interesse para caracterização do modelo conceitual. A seguir, cada etapa da simulação é detalhada.

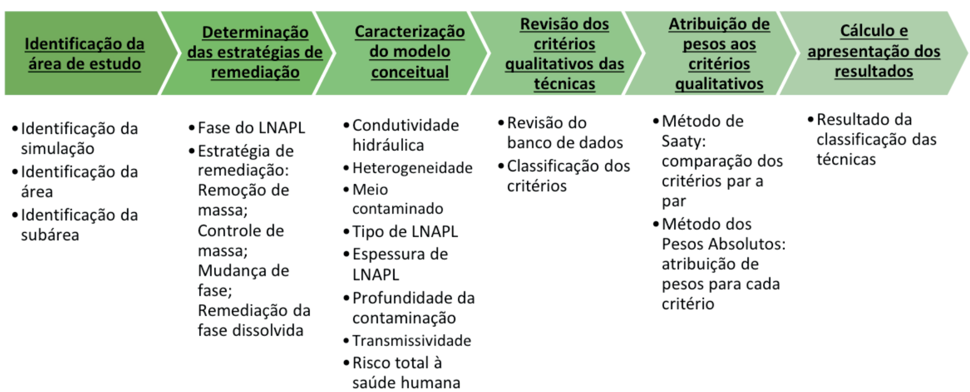


Figura 2.17. Etapas da simulação com o STR.

2.6 Identificação da área de estudo

A primeira etapa da simulação com o STR consiste na identificação da área de estudo. Para isso, selecione a aba “1 – Identificação da área de estudo” localizada no canto superior esquerdo (Figura 2.18).

Nessa etapa, devem ser preenchidas as informações a respeito da simulação, como o título do projeto, o responsável técnico e a localização da área e da subárea (se houver). No item “Identificação da Área → Nome da Área”, podem ser selecionadas as áreas de estudo previamente cadastradas no banco de dados, ao clicar no botão destacado (Figura 2.18).

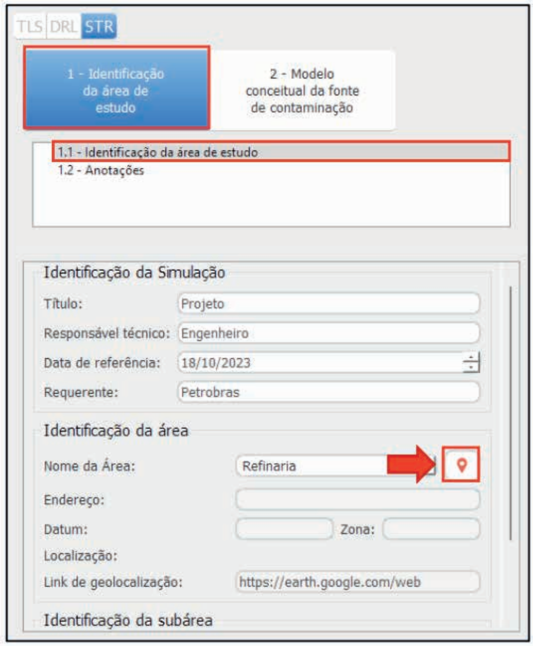


Figura 2.18. Identificação da área de estudo.

Para cadastrar novas áreas e subáreas de estudo, basta clicar no ícone indicado pela seta na Figura 2.18. É necessário adicionar o link de geolocalização da área de interesse (Figura 2.19) ou as coordenadas geográficas. Como exemplo, é sugerida a utilização do *Google Earth* (versão web), conforme apresentado na Figura 2.20. Contudo, outros links, como a *homepage* do projeto, também poderão ser inseridos. Para visualizar o link de referência, copie-o e cole no navegador *web*. Após o preenchimento desses dados, clique em “Salvar” .

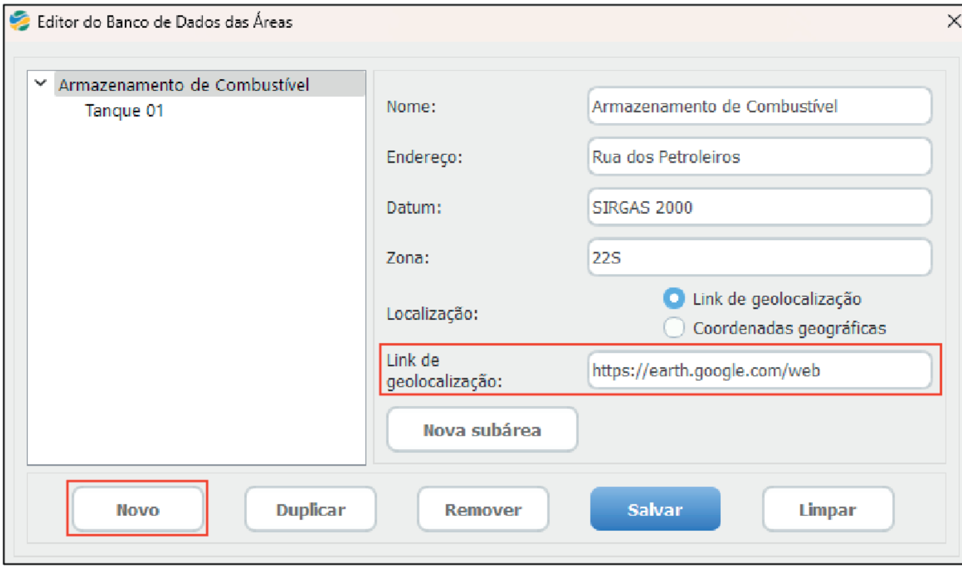


Figura 2.19. Editor do banco de dados das áreas.

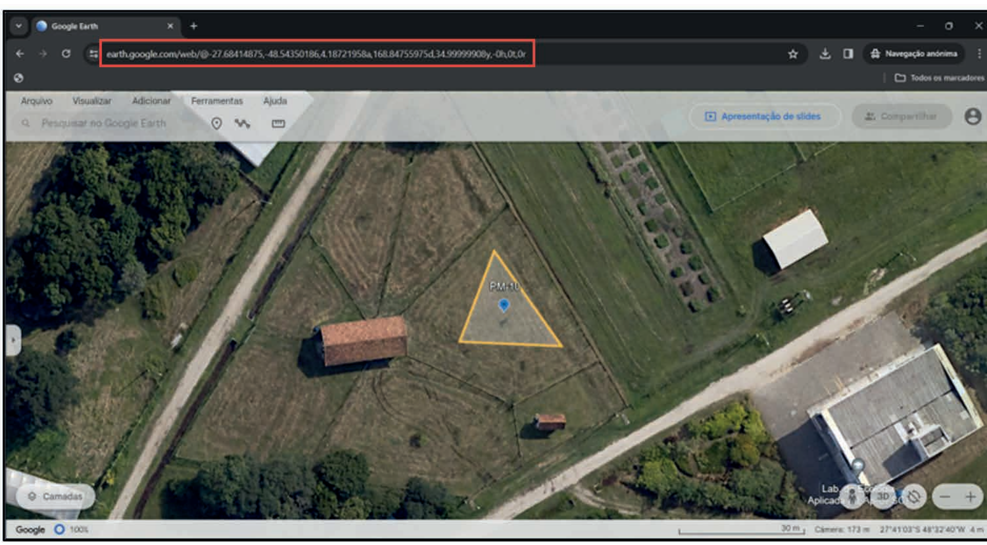


Figura 2.20. Localização da área de estudo por link de geolocalização.

O campo anotações está disponível para registrar informações adicionais a respeito da área ou da simulação (Figura 2.21). Essas informações são apresentadas ao final da simulação no relatório final.

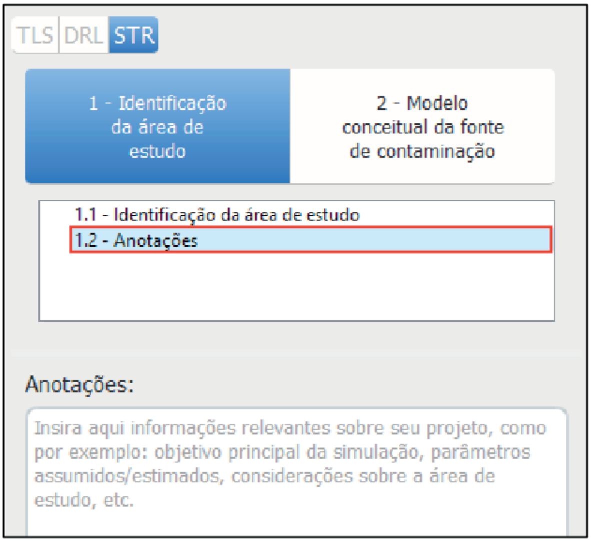


Figura 2.21. Campo para anotações gerais.

2.7 Modelo conceitual da fonte de contaminação

Após a identificação do projeto e área de estudo, a próxima etapa consiste na definição do modelo conceitual da fonte de contaminação. Essa etapa inclui definir a estratégia de remediação, inserir os dados relacionados ao modelo conceitual, revisar o banco de dados, escolher o método para determinar o peso de cada critério na classificação das técnicas e, por fim, calcular os resultados.

2.7.1 Estratégia de remediação

Primeiramente, deve ser selecionada a fase em que o LNAPL se encontra: residual, livre ou dissolvida. Em seguida, a estratégia de remediação. A escolha da estratégia de remediação é uma das mais importantes na simulação, pois determinará quais grupos de tecnologias de remediação terão êxito na eliminação das preocupações relacionadas ao LNAPL. A aba "Estratégias de remediação" apresenta um fluxograma com o resumo das possíveis preocupações, objetivos e estratégias de remediação que podem ser o foco de atuação do analista técnico, de forma a auxiliar na definição da estratégia de remediação. Para mais informações sobre a escolha da estratégia de remediação, consulte o Item 3.2.

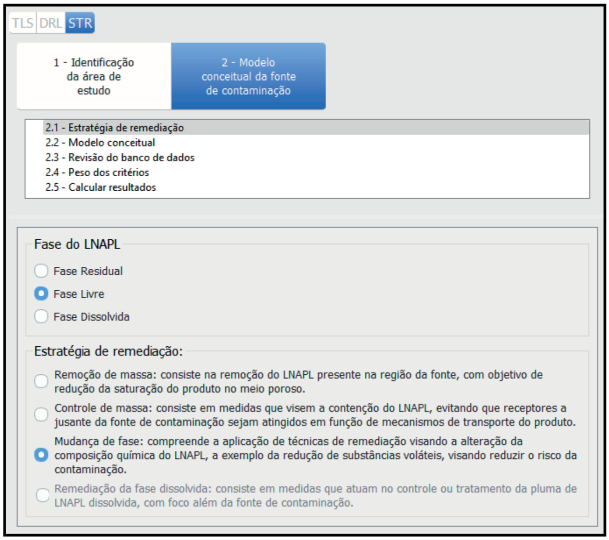


Figura 2.22. Estratégia de remediação do modelo conceitual.

2.7.2 Modelo conceitual

A etapa "Modelo Conceitual" diz respeito à inserção das características da área de estudo (Figura 2.23). A partir dessas informações, serão selecionadas as técnicas aplicáveis ao meio.

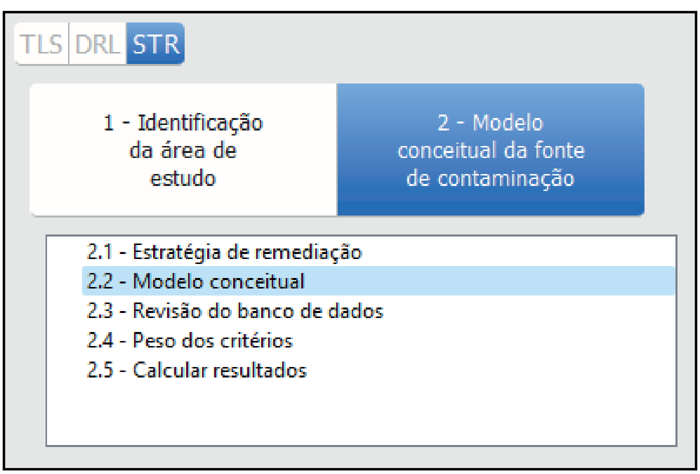


Figura 2.23. Definição do modelo conceitual.

Os dados de entrada solicitados para elaboração do modelo conceitual incluem (Figura 2.24):

- **Condutividade Hidráulica:** é possível inserir o valor da condutividade hidráulica em cm/s ou selecionar o tipo de solo a partir da barra de rolagem.

- **Heterogeneidade:** deve ser informado se a heterogeneidade na área de interesse é classificada como baixa ou alta.
- **Tipo de LNAPL:** deve ser selecionado o tipo de LNAPL: leve (ex. nafta, gasolina); médio (ex. diesel, QAV); pesado (ex. óleo, combustível, petróleo) ou intemperizado.
- **Meio contaminado:** deve ser selecionada a zona contaminada: zona saturada ou zona não saturada. Caso o LNAPL esteja na fase livre, não é possível selecionar a zona não saturada.
- **Espessura de LNAPL (b):** selecionar a espessura do LNAPL: película ($b \leq 5$ mm); baixa ($5 < b < 100$ mm); média ($100 < b < 500$ mm); ou alta ($b > 500$ mm). Só é possível selecionar a opção "película" caso a estratégia de remediação seja "mudança de fase".
- **Profundidade da contaminação (Z):** deve ser selecionada a profundidade que se encontra a contaminação: baixa ($Z \leq 4$ m); média ($4 < Z \leq 9$ m); ou alta ($Z > 9$ m).
- **Transmissividade:** caso tenham sido realizados testes de transmissividade do produto, o valor obtido pode ser informado.
- **Risco total à saúde humana:** devem ser definidos os limites toleráveis de risco à saúde humana. Os limites padrão do STR são estabelecidos conforme a Resolução CONAMA nº 420/2009, porém é permitido que o usuário altere, caso deseje utilizar outra referência normativa. Definidos os limites toleráveis, deve-se informar se os riscos calculados para a área de estudo estão ou não acima dos limites toleráveis, ou se o risco não foi calculado.

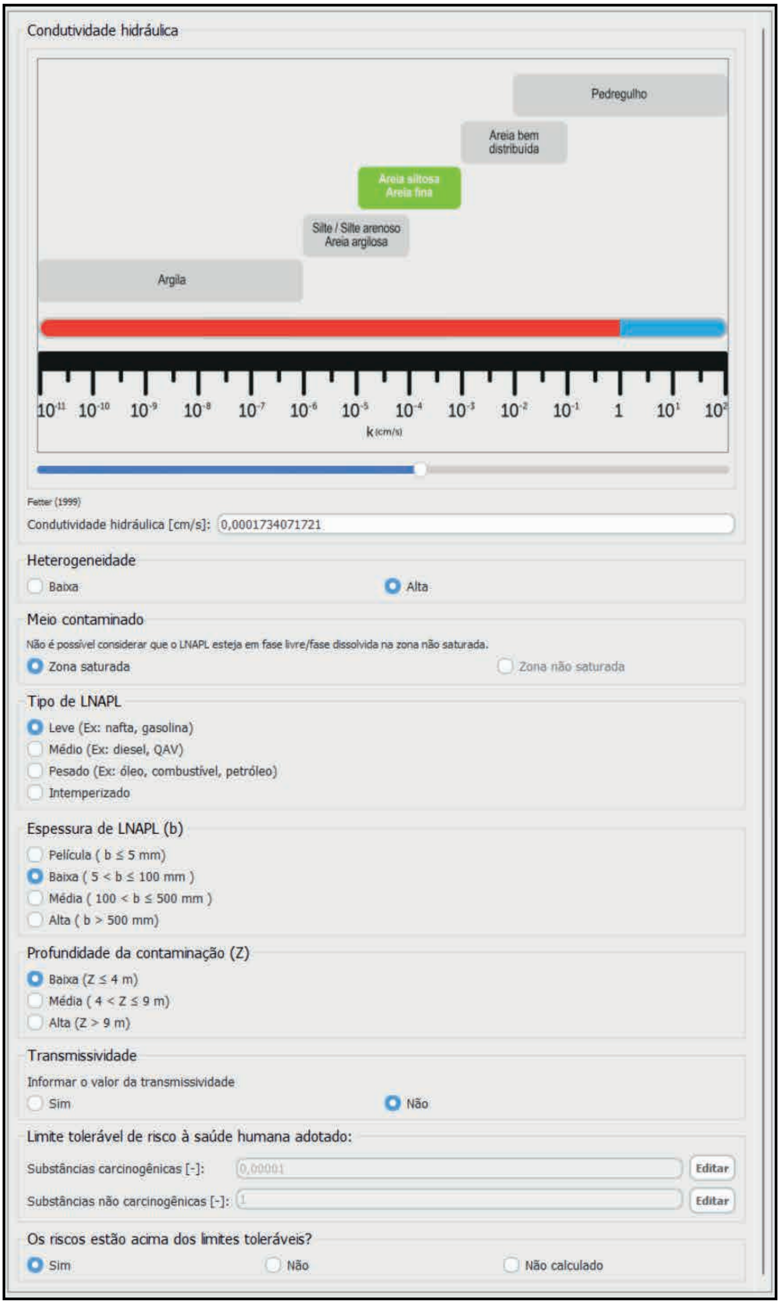


Figura 2.24. Dados de entrada para definição do Modelo Conceitual da área.

2.7.3 Revisão do banco de dados

As informações contidas no banco de dados do STR seguem os conceitos gerais das técnicas. Entretanto, sabe-se que condições específicas da área de estudo podem

favorecer ou desfavorecer alguns critérios em relação a determinadas técnicas. Dessa forma, a revisão do banco de dados é essencial para garantir um resultado mais preciso e condizente com a realidade do local.

A revisão dos critérios é feita para as técnicas que foram selecionadas para aplicação na área, com base no modelo conceitual inserido. Para revisar o banco de dados deve-se selecionar o botão “Visualizar técnicas aplicáveis à área” e, em seguida, a estratégia desejada, sendo ela prioritária ou secundária (Figura 2.25).

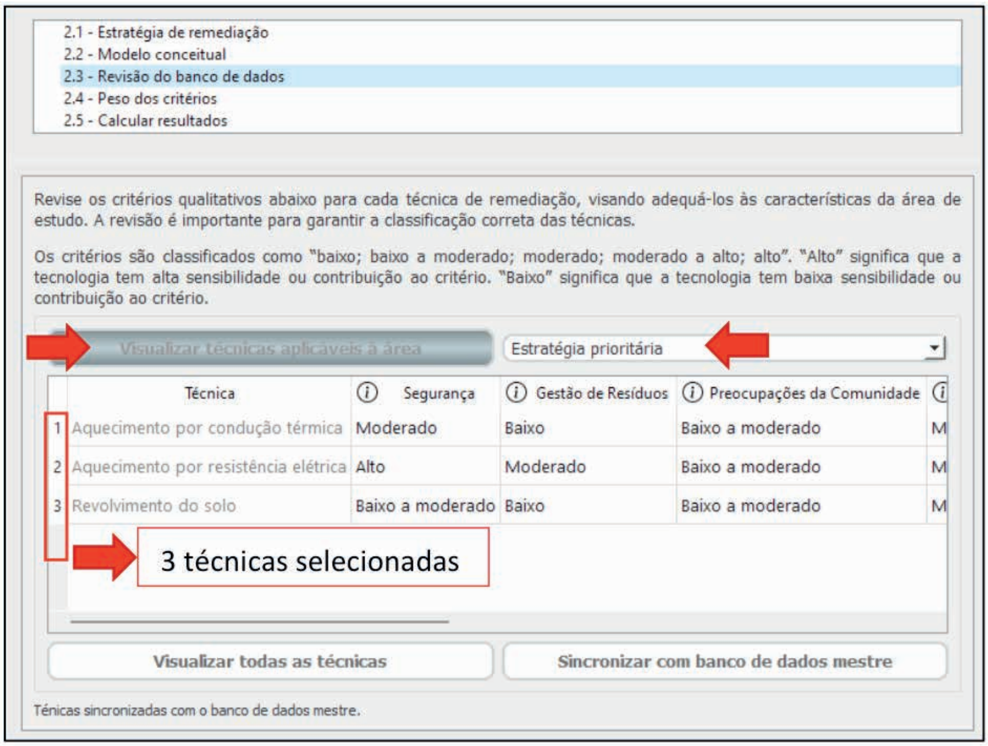


Figura 2.25. Revisão do banco de dados do modelo conceitual.

Após visualizar as técnicas aplicáveis à área, inicia-se a etapa de classificação qualitativa das técnicas baseadas em critérios de seleção. Os critérios devem ser ajustados, conforme indicado na Figura 2.26.

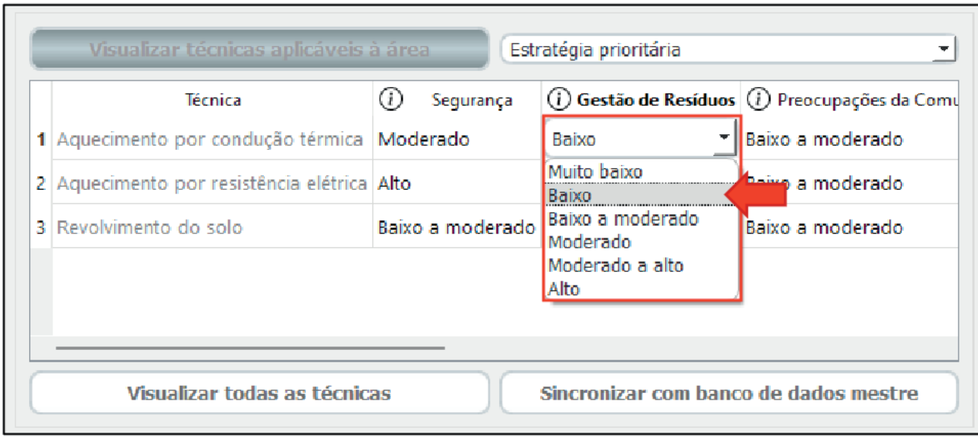


Figura 2.26. Alteração dos critérios de avaliação no banco de dados local.

Os critérios são classificados em “muito baixo; baixo; baixo a moderado; moderado; moderado a alto; e alto”. “Alto” significa que a tecnologia tem **alta sensibilidade** ou alta contribuição ao critério. “Baixo” significa que a tecnologia tem **baixa sensibilidade** ou baixa contribuição ao critério.

Deve-se ter atenção para o critério “Segurança”: a atribuição de “Alto” significa que há alta sensibilidade ao critério, ou seja, aquela técnica é altamente insegura. A atribuição de “Baixo”, portanto, significa que há baixa sensibilidade ao critério, ou seja, a técnica é muito segura. A seguir são apresentados alguns exemplos de possíveis alterações no banco de dados.

- **Exemplo 1:** para o critério “Custo”, por padrão, determinada técnica é classificada como “Alto”, entretanto, o local apresenta condições que poderiam reduzir o custo desta tecnologia. Nesse caso, é possível alterar a classificação para um valor menor, como “Moderado”.

- **Exemplo 2:** para o critério “Outros Regulamentos”, por padrão, determinada técnica é classificada como “Baixo a moderado”, entretanto, sabe-se que esta técnica tem dificuldade em ser aprovada pelo órgão ambiental local, portanto, seria possível alterar a classificação para “Alto”.

2.7.4 Peso dos critérios

Nessa etapa da simulação, o usuário deve determinar o peso de cada critério qualitativo. Para isso, primeiramente deve ser selecionado o método matemático que será utilizado pelo simulador para classificação das técnicas selecionadas. Os métodos disponíveis são o **Método de Saaty** e **Método dos Pesos Absolutos**, conforme mostra a Figura 2.27. Para mais informações sobre os métodos e quando selecioná-los, consulte o Item 3.6.

Escolhido o método, o usuário deve estabelecer pesos para cada critério qualitativo (segurança, gestão de resíduos etc.), de acordo com sua própria avaliação, priorizando o que é mais importante para as características da área e para a visão da empresa de acordo com seu julgamento técnico.

Visto que essas modificações dependem do usuário, é possível que para uma mesma área, diferentes analistas tenham diferentes julgamentos, e assim, serão gerados diferentes resultados de simulação. Dessa forma, recomenda-se que toda alteração do banco de dados ou atribuição de pesos aos critérios seja documentada pelo usuário com as respectivas justificativas, para que se tenha um registro das justificativas adotadas.

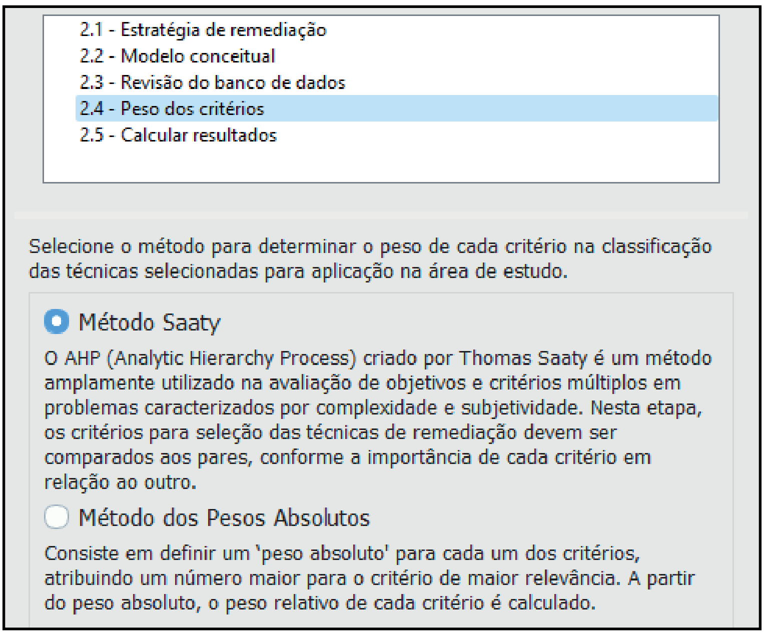


Figura 2.27. Seleção do método de atribuição dos pesos dos critérios.

2.7.5 Calcular Resultados

Ao clicar em “Calcular Resultados”, conforme indicado na Figura 2.28, as técnicas aplicáveis à área de estudo serão classificadas conforme os pesos atribuídos previamente aos critérios. Na janela localizada à direita da interface, aparecerão os resultados da classificação de cada técnica e sua respectiva pontuação (conforme a Figura 2.29). Também são exibidas as classificações por critérios (Figura 2.30) e a classificação com valores quantitativos, referentes à aplicabilidade da técnica, para apoio à tomada de decisão.

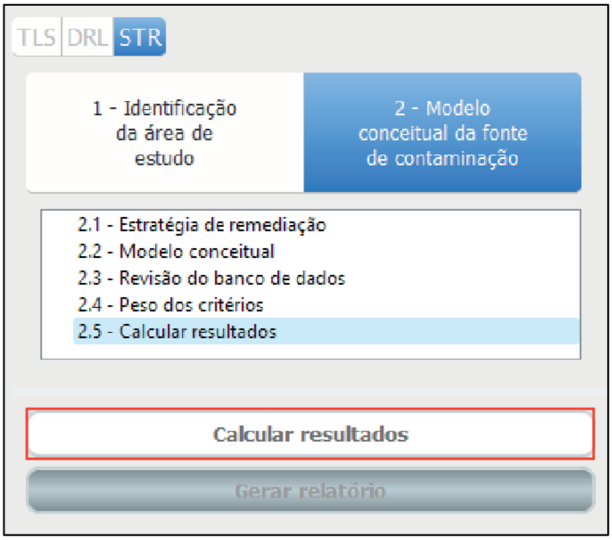
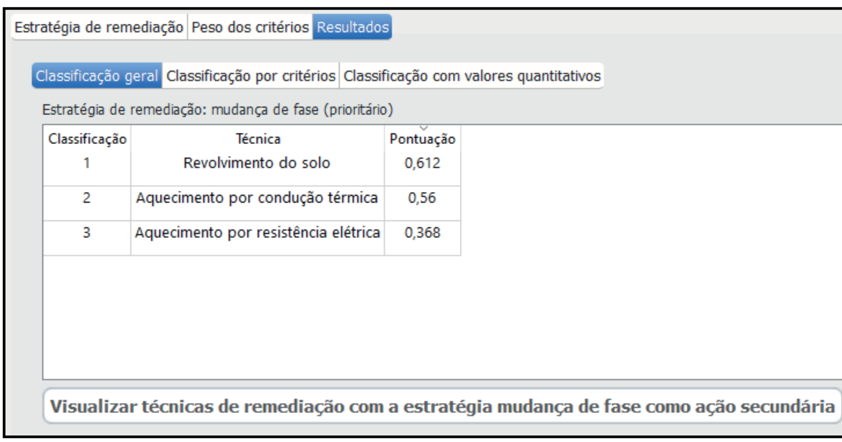
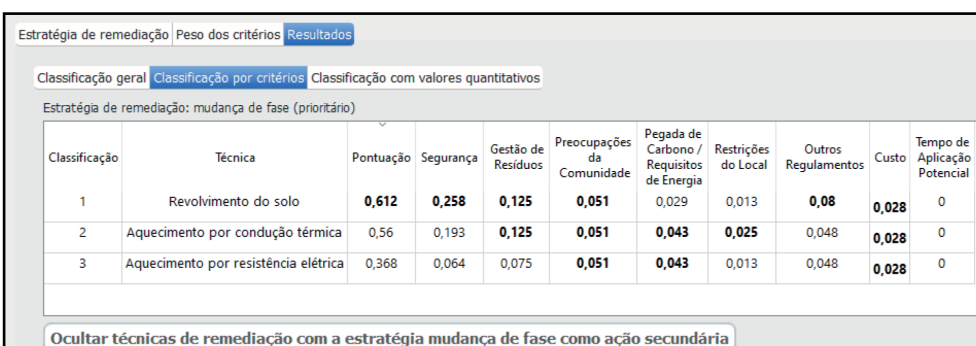


Figura 2.28. Calcular resultados para classificar as tecnologias.



Classificação	Técnica	Pontuação
1	Revolvimento do solo	0,612
2	Aquecimento por condução térmica	0,56
3	Aquecimento por resistência elétrica	0,368

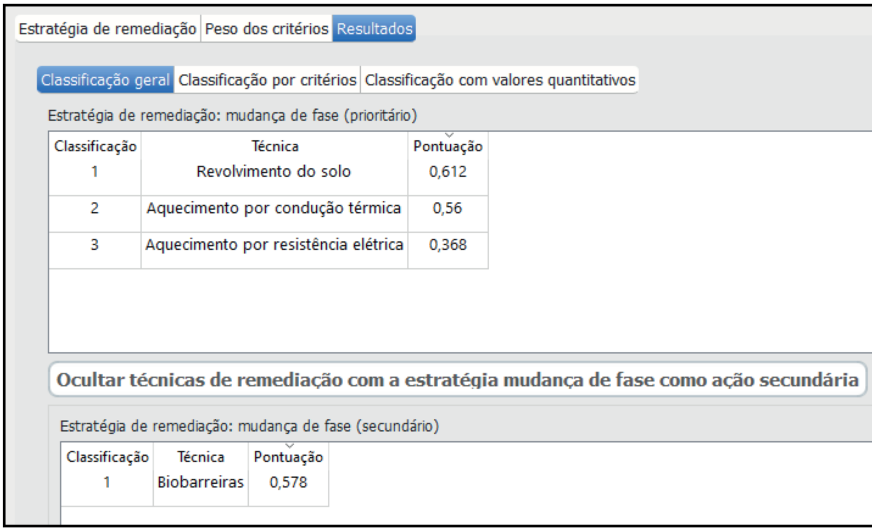
Figura 2.29. Classificação geral das tecnologias de remediação prioritárias.



Classificação	Técnica	Pontuação	Segurança	Gestão de Resíduos	Preocupações da Comunidade	Pegada de Carbono / Requisitos de Energia	Restrições do Local	Outros Regulamentos	Custo	Tempo de Aplicação Potencial
1	Revolvimento do solo	0,612	0,258	0,125	0,051	0,029	0,013	0,08	0,028	0
2	Aquecimento por condução térmica	0,56	0,193	0,125	0,051	0,043	0,025	0,048	0,028	0
3	Aquecimento por resistência elétrica	0,368	0,064	0,075	0,051	0,043	0,013	0,048	0,028	0

Figura 2.30. Classificação por critérios das tecnologias de remediação prioritárias.

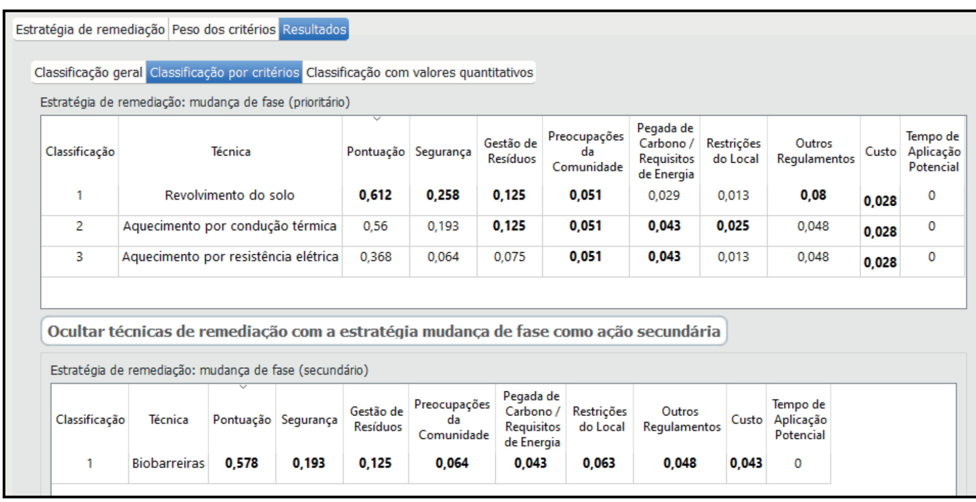
Para visualizar a classificação das técnicas para a estratégia secundária, como apresentam as Figuras 2.31 e 2.32, deve-se clicar no botão “Visualizar técnicas de remediação com o objetivo mudança de fase como ação secundária”, como ilustram as Figuras 2.29 e 2.30. A estratégia descrita na mensagem varia de acordo com a estratégia de remediação selecionada.



Classificação	Técnica	Pontuação
1	Revolvimento do solo	0,612
2	Aquecimento por condução térmica	0,56
3	Aquecimento por resistência elétrica	0,368

Classificação	Técnica	Pontuação
1	Biobarreiras	0,578

Figura 2.31. Classificação geral das tecnologias de remediação.



Classificação	Técnica	Pontuação	Segurança	Gestão de Resíduos	Preocupações da Comunidade	Pegada de Carbono / Requisitos de Energia	Restrições do Local	Outros Regulamentos	Custo	Tempo de Aplicação Potencial
1	Revolvimento do solo	0,612	0,258	0,125	0,051	0,029	0,013	0,08	0,028	0
2	Aquecimento por condução térmica	0,56	0,193	0,125	0,051	0,043	0,025	0,048	0,028	0
3	Aquecimento por resistência elétrica	0,368	0,064	0,075	0,051	0,043	0,013	0,048	0,028	0

Classificação	Técnica	Pontuação	Segurança	Gestão de Resíduos	Preocupações da Comunidade	Pegada de Carbono / Requisitos de Energia	Restrições do Local	Outros Regulamentos	Custo	Tempo de Aplicação Potencial
1	Biobarreiras	0,578	0,193	0,125	0,064	0,043	0,063	0,048	0,043	0

Figura 2.32. Classificação por critérios das tecnologias de remediação.

2.7.6 Relatório final de simulação

Clicando no botão “Gerar relatório” (Figura 2.34), a simulação realizada é exportada em formato *.pdf* ou *.html* para um relatório final. Para escolher o formato do arquivo clique em “Tipo”, conforme a Figura 2.33. O relatório final de simulação tem o intuito de apresentar

um resumo de todas as etapas da simulação, incluindo as informações de identificação do local, os parâmetros inseridos para seleção das técnicas e os resultados obtidos.

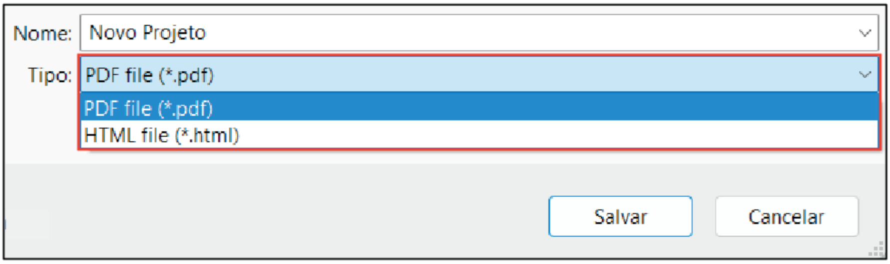


Figura 2.33. Seleção do formato do relatório (*.pdf* ou *.html*).

Além do resumo das etapas da simulação, o relatório traz também as métricas de desempenho para as técnicas selecionadas. As métricas de desempenho são parâmetros que devem ser acompanhados para o adequado monitoramento da operação e do progresso da técnica de remediação. Além disso, o relatório também compila todas as técnicas que não foram selecionadas e quais parâmetros foram responsáveis por desclassificar a técnica. Um exemplo de relatório final está disponível no ANEXO A.

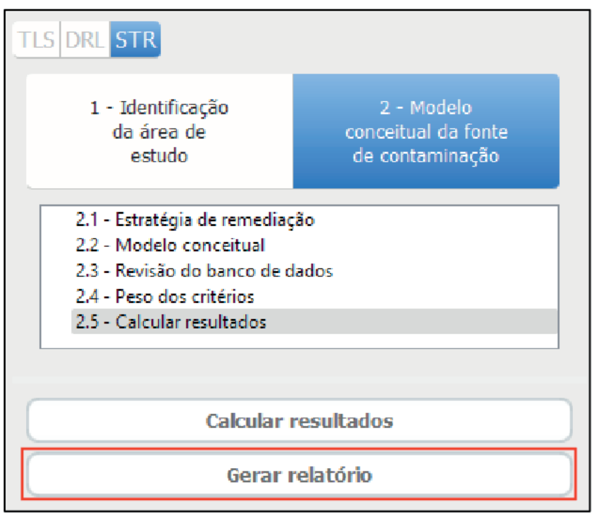


Figura 2.34. Gerar o relatório final da simulação.

3 PERGUNTAS FREQUENTES

3.1 Como salvar e compartilhar os projetos do SUITE?

Os projetos executados no SUITE ficam armazenados em arquivos com extensão "*.db*", criados sempre ao inicializar o software, conforme descrito no Item 1. Para compartilhar os dados de entrada utilizados na simulação, incluindo as áreas e subáreas cadastradas, solos e produtos inseridos no banco de dados, basta compartilhar o arquivo com extensão *.db* de interesse.

Sugere-se que, ao criar o banco de dados, o usuário nomeie o arquivo com informações que facilitem sua identificação. O prefixo "BD" pode ser inserido para remeter ao arquivo do banco de dados. Também podem ser inseridas informações sobre o responsável técnico e a data de criação do banco de dados, conforme o exemplo descrito na Figura 3.1.

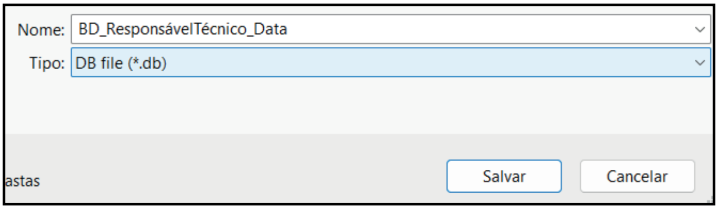


Figura 3.1. Sugestão de identificação do arquivo extensão *.db*.

Ressalta-se que esse arquivo possui atualização automática; ou seja, ao longo da simulação, as alterações feitas serão registradas. Caso o usuário deseje abrir uma simulação realizada anteriormente em um banco de dados existente, ao abrir o SUITE, deverá clicar em "Carregar banco de dados" e selecionar o arquivo *.db* no qual a simulação foi previamente criada (Figura 3.2).

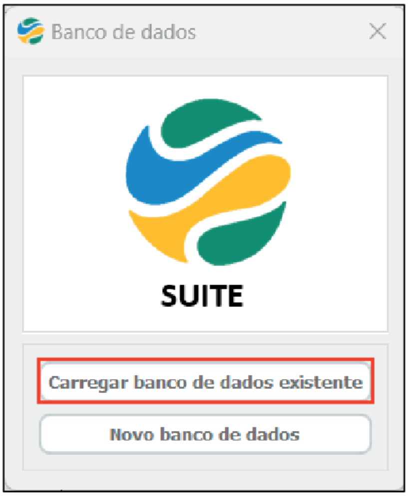


Figura 3.2. Seleção de banco de dados criado previamente.

3.2 Como definir a estratégia de remediação?

Para auxiliar o usuário na escolha da estratégia de remediação, a interface traz um fluxograma com as possíveis preocupações, objetivos e estratégias de remediação que podem ser o foco de atuação do analista técnico. O fluxograma pode ser observado na Figura 3.3.

As estratégias de remediação foram classificadas da seguinte forma:

- **Objetivos baseados em composição:** a composição do LNAPL muda por meio da remoção dos constituintes do LNAPL que se degradam, volatilizam ou se dissolvem facilmente. Sendo assim, para esse objetivo são indicadas, principalmente, tecnologias de mudança de fase do LNAPL. Esse objetivo pode ser selecionado quando houver potenciais riscos de incêndio e explosões em decorrência do LNAPL que comprometam a segurança do local, além de potencial exposição ao LNAPL que possa resultar em riscos ecológicos ou à saúde humana, que podem ser verificados através da Avaliação de Risco;
- **Objetivos baseados em saturação:** esses objetivos visam limitar a mobilidade ou eliminar a migração e, por isso, as tecnologias de controle e remoção de massa do LNAPL são mais indicadas. São aplicados quando houver preocupações relacionadas à migração do LNAPL, possível liberação contínua de LNAPL, potencial de migração futura do LNAPL que possa criar novas rotas de exposição e exigências regulatórias a respeito da presença de LNAPL móvel; e
- **Objetivos baseados em fatores estéticos:** são direcionados a problemas de manchas e odores que não representam risco e instabilidade geotécnica do solo contaminado por LNAPL. Sendo assim, são indicadas tecnologias de controle e remoção de massa e, para tratamento de vapores, tecnologias de mudança de fase.

Identificadas as preocupações e possíveis objetivos de remediação, deve-se definir a estratégia de remediação, que será um parâmetro de entrada do simulador. As estratégias de remediação estão descritas a seguir:

- **Controle de massa:** tecnologias com a finalidade de reduzir a mobilidade e conter a migração do LNAPL, evitando que receptores à jusante da fonte de contaminação sejam atingidos em função de mecanismos de transporte do produto;
- **Remoção de massa:** consiste na remoção do LNAPL presente na região da fonte, com objetivo de redução da saturação do produto no meio poroso ou remoção da fase livre. As tecnologias de remoção de massa recuperam o LNAPL por meio de remoção física, como escavação de solo saturado de LNAPL ou recuperação hidráulica (por exemplo, bombeamento e *skimming*). A recuperação de massa de LNAPL usando tecnologias de recuperação hidráulica é limitada a reduzir a saturação de LNAPL à saturação residual. Já a técnica de escavação pode promover a remoção completa do LNAPL. Na saturação residual, o LNAPL não fluirá e, portanto, a recuperação hidráulica não será mais possível;

- **Mudança de fase:** compreende a aplicação de técnicas de remediação visando à alteração da composição química do LNAPL, a exemplo da redução de substâncias voláteis, visando reduzir o risco da contaminação. As tecnologias de mudança de fase de LNAPL são, portanto, principalmente aplicáveis a preocupações de LNAPL baseadas em composição. A mudança de fase de LNAPL pode resultar em alguma redução de saturação (por exemplo, a técnica de extração de vapores do solo, quando aplicada à gasolina, pode reduzir a saturação geral deste LNAPL), portanto, essas tecnologias podem ter alguma aplicação secundária para objetivos de correção de LNAPL baseados em saturação. Algumas tecnologias de mudança de fase do LNAPL são mais difíceis para projetar e implementar do que as tecnologias de recuperação em massa do LNAPL, e seus limites praticáveis podem não ser tão bem estabelecidos quanto os das tecnologias de recuperação de massa. Assim, pensando em uma estratégia de aplicação de técnicas mais eficiente, recomenda-se que as tecnologias de mudança de fase sejam aplicadas quando as tecnologias de remoção de massa tenham atingido seu limite de recuperação; e
- **Controle da fase dissolvida:** consiste em medidas que atuam no controle ou tratamento da pluma de LNAPL dissolvida. Sabe-se que estratégias de remediação que atuam na fonte de contaminação também podem contribuir indiretamente para a diminuição das concentrações na fase dissolvida. Esse objetivo tem o foco além da fonte de contaminação, portanto, seleciona as técnicas que podem ser aplicadas diretamente à fase dissolvida. A escolha desse objetivo é recomendada em casos onde existem preocupações relacionadas à fase dissolvida e que somente a atuação na fonte de contaminação não é suficiente para eliminá-las, sendo necessária assim, a utilização de uma técnica de remediação aplicada especificamente à fase dissolvida.

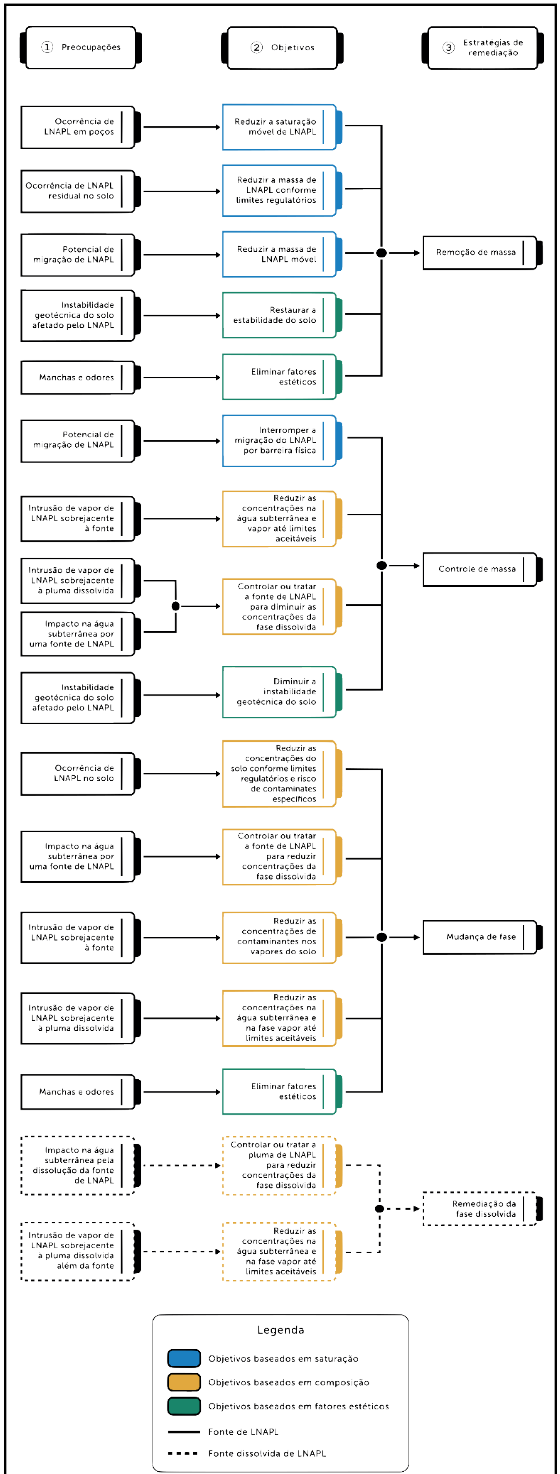


Figura 3.3. Fluxograma para seleção das estratégias de remediação.

3.3 O que são estratégias prioritárias e secundárias?

As técnicas de remediação podem ser classificadas em estratégia prioritária, ou seja, aquela que representa a estratégia principal da tecnologia, e uma estratégia secundária, que indica que a técnica também pode atuar por meio desta estratégia, porém não prioritariamente ou somente sob condições específicas. Por exemplo, no Bombeamento e Tratamento da fonte, a estratégia prioritária consiste na remoção de massa do LNAPL (redução da saturação), enquanto a ação secundária corresponde ao controle de massa, visto que o bombeamento de fase livre pode interromper a migração do produto para áreas adjacentes, além de impedir a formação de novas plumas dissolvidas.

O banco de dados do STR incorpora técnicas com estratégias prioritárias e secundárias. Na simulação, caso não haja técnicas aplicáveis na estratégia prioritária no modelo conceitual, ou haja apenas técnicas inviáveis para a situação, considerando demais aspectos, as técnicas da estratégia secundária podem ser consideradas para a remediação.

3.4 Como funciona o banco de dados do STR?

O banco de dados do STR está dividido em banco de dados mestre e banco de dados local. No banco de dados mestre estão inseridas as estratégias, características e critérios padrão para cada tecnologia, não sendo possível editá-las. Já no banco de dados local, é possível alterar os critérios de cada técnica, ou apenas das técnicas aplicáveis à área, considerando as características da situação e do local a ser simulado.

Para abrir o banco de dados do STR, o usuário deve clicar no ícone localizado logo abaixo do menu “Simuladores”, como indicado na Figura 3.4. Ou então, basta ir em “Banco de Dados → Abrir editor de Banco de Dados STR”, como indicado na Figura 3.5.

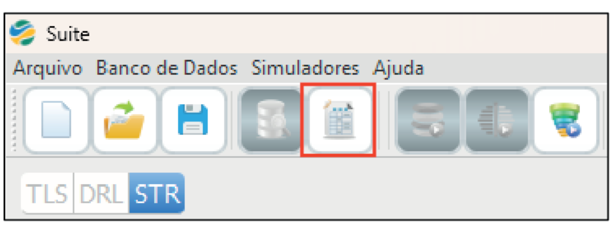


Figura 3.4. Ícone do banco de dados do STR.

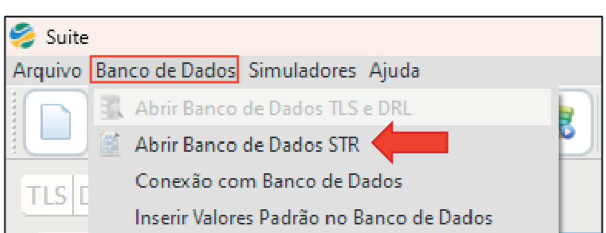
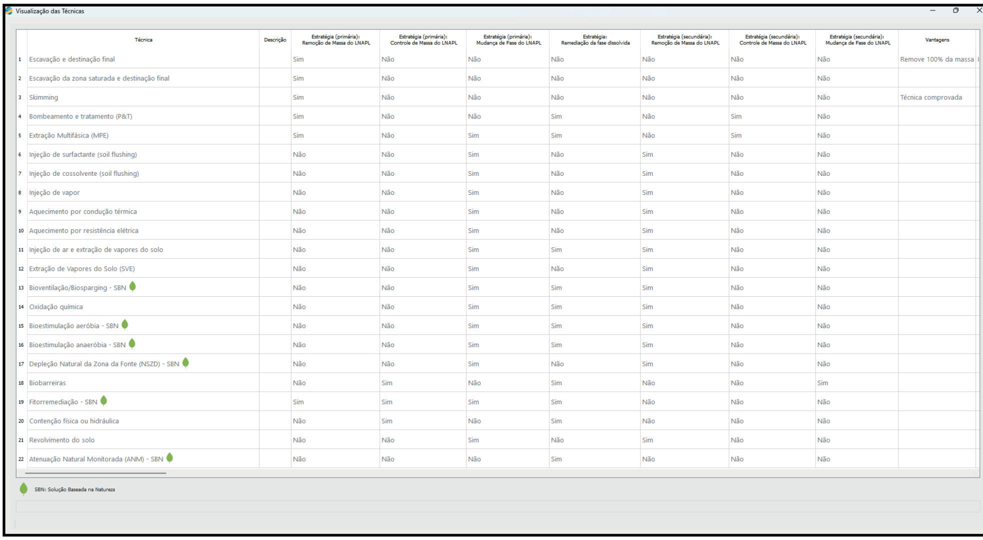


Figura 3.5. Abrir banco de dados do STR.

Selecionando uma dessas opções, surge a janela onde é possível visualizar o banco de dados do STR. Neste, estão presentes as informações para seleção das técnicas aplicáveis ao meio, valores quantitativos referentes à aplicabilidade das técnicas, as atribuições referentes aos critérios de classificação e as técnicas classificadas como Soluções Baseadas na Natureza (SBN). A janela de visualização do banco de dados pode ser observada na Figura 3.6.



	Técnica	Descrição	Estratégia (primária): Remoção de Massa do LNAPL	Estratégia (primária): Controle de Massa do LNAPL	Estratégia (primária): Mudança de Fase do LNAPL	Estratégia: Remediação da fase dissolvida	Estratégia (secundária): Remoção de Massa do LNAPL	Estratégia (secundária): Controle de Massa do LNAPL	Estratégia (secundária): Mudança de Fase do LNAPL	Vantagens
1	Escavação e destinação final		Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Remove 100% da massa
2	Escavação da zona saturada e destinação final		Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
3	Skimming		Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Técnica comprovada
4	Bombeamento e tratamento (P&T)		Sim	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	
5	Extração Multifásica (MPE)		Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não	
6	Injeção de surfactante (soil flushing)		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
7	Injeção de cossolvente (soil flushing)		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
8	Injeção de vapor		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
9	Aquecimento por condução térmica		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
10	Aquecimento por resistência elétrica		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
11	Injeção de ar e extração de vapores do solo		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não	
12	Extração de Vapores do Solo (SVE)		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
13	Bioventilação/Biosparging - SBN		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não	
14	Oxidação química		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não	
15	Bioestimulação aeróbia - SBN		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não	
16	Bioestimulação anaeróbia - SBN		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não	
17	Depleção Natural da Zona da Fonte (NSZD) - SBN		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
18	Biobarreiras		Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	Sim	
19	Fitorremediação - SBN		Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	
20	Contenção física ou hidráulica		Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	
21	Revolvimento do solo		Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	
22	Atenuação Natural Monitorada (ANM) - SBN		Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	

SBN: Solução Baseada na Natureza

Figura 3.6. Visão geral do banco de dados mestre.

Toda vez que um novo projeto é criado, o simulador faz uma cópia do banco de dados mestre. Na etapa de revisão do banco de dados, todas as informações alteradas diretamente na tabela contendo as técnicas selecionadas (Figura 3.7) serão consideradas apenas para aquela simulação, ou seja, correspondem ao banco de dados local da simulação e não alterarão o banco de dados mestre.

Ainda na etapa de revisão do banco de dados, caso deseje-se sincronizar as informações presentes no banco de dados mestre com o banco de dados local, deve-se clicar em “sincronizar com BD mestre”, conforme indicado na Figura 3.7. No canto inferior esquerdo é possível verificar se o banco de dados com o qual se está trabalhando está sincronizado com o mestre ou se foram feitas alterações.

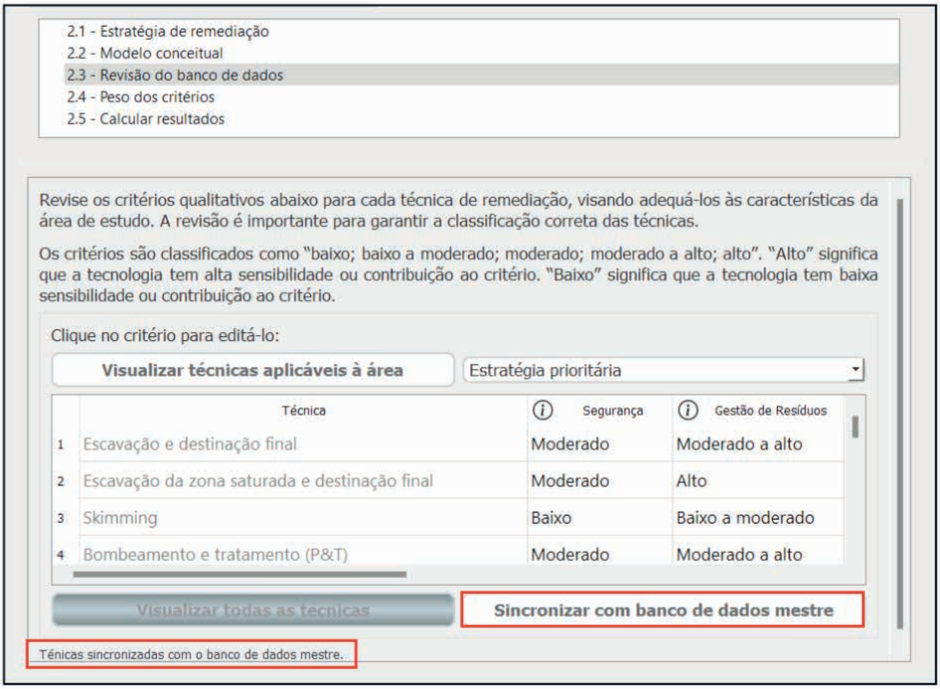


Figura 3.7. Visão geral do banco de dados local.

3.5 Como considerar o encadeamento de técnicas?

É bastante provável que, para uma mesma área, exista mais de uma preocupação relacionada ao LNAPL. Portanto, pode ser necessário a definição de mais de uma estratégia de remediação. De forma a considerar o encadeamento de técnicas e garantir a construção de uma estratégia de remediação mais assertiva, recomenda-se que o usuário crie uma nova simulação para cada preocupação do LNAPL (exemplo: potencial migração do LNAPL, impacto na água subterrânea etc.).

Para avaliar e definir qual (ou quais) técnicas serão utilizadas para a remediação da área, o analista técnico deve levar em consideração o conjunto de simulações feitas para diferentes preocupações. A partir disso, é possível construir uma estratégia de remediação que elimine todas as preocupações e atinja as metas determinadas de forma mais eficiente.

3.6 Quando utilizar o método de Saaty ou Pesos Absolutos?

O simulador dispõe de dois métodos para a determinação dos pesos dos critérios, o Método de Saaty, que possibilita a avaliação dos critérios aos pares, e o método dos Pesos Absolutos, em que o usuário atribui pesos absolutos para cada critério e o simulador calcula os pesos relativos. A seguir são apresentados mais detalhes sobre como utilizar cada método e quando escolhê-los.

- **Método de Saaty**

O AHP (*Analytic Hierarchy Process*) criado por Thomas Saaty é um método amplamente utilizado na avaliação de objetivos e critérios múltiplos em problemas caracterizados por complexidade e subjetividade. Nessa etapa, os critérios para seleção das técnicas de remediação devem ser comparados aos pares, conforme a importância de cada critério em relação ao outro.

O agrupamento da escala de prioridades do método de Saaty é representado por uma matriz quadrada, em que os elementos são comparados entre si. Os elementos dispostos na linha são comparados com cada elemento da coluna e é registrado o valor de escolha de importância na matriz na posição linha e coluna referente aos critérios comparados. A Tabela 3.1 apresenta, de modo genérico, a matriz de importância, na qual x_{ij} representa os valores de entrada no nível de importância variando i e j de 1 a n.

Tabela 3.1. Matriz de importância do método de Saaty

	a_1	a_2	a_3	...	a_n
a_1	1	x_{12}	x_{13}	...	x_{1n}
a_2	$1/x_{12}$	1	x_{23}	...	x_{2n}
a_3	$1/x_{13}$	$1/x_{23}$	1	...	x_{3n}
...	...	...	...	...	...
a_n	$1/x_{1n}$	$1/x_{2n}$	$1/x_{3n}$	...	1

Sendo assim, para cada nível de importância registrado na posição de linha i e coluna j, representado por x_{ij}, há um valor igual a $1/x_{ij}$ na posição recíproca, ou seja, na posição de linha j e coluna i. Para as posições recíprocas são adotadas as seguintes considerações:

- Se $x_{ij} = \alpha$, *então* $x_{ji} = 1/\alpha$, sendo α o nível de importância adotado para um critério em sua comparação respectiva.
- Se os dois critérios a serem comparados possuírem o mesmo nível de importância, então i = j = 1, sendo assim $x_{ij} = 1$ e $x_{ji} = 1$.

A escala sugerida por Saaty (1991), apresentada na Tabela 3.2, encontra-se entre 1 e 9, sendo 1 a indiferença de importância de um critério em relação ao outro e 9 a mais alta importância de um critério quando comparado a outro. A Tabela 3.2 apresenta a escala de importância utilizada no método de Saaty. Ademais, desconsiderando as comparações realizadas entre os próprios critérios, em que são considerados 1 na escala, apenas metade das comparações na matriz necessita ser realizada, visto que nas demais comparações são considerados os valores recíprocos, isto é, os valores inversos da importância dos critérios.

Tabela 3.2. Nível de importância para o método de Saaty

Escala numérica	Escala conceitual	Definição
1	Mesma importância	Ambos os critérios comparados têm o mesmo nível de importância
3	Baixa	Um critério comparado é ligeiramente mais importante que o outro
5	Grande	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um critério em relação ao outro
7	Muito grande	Um critério é muito mais importante em relação a outro, sendo possível observar a importância na prática
9	Absoluta	Um critério apresenta o mais alto nível de importância em relação ao outro
2, 4, 6, 8	Utilizado quando é procurado um nível de importância que se encontra entre os valores descritos acima	

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

O critério de maior importância a ser comparado é utilizado como um valor inteiro da escala e o menos importante, como o valor inverso. Além disso, se o critério localizado na linha for o menos importante da comparação, deve ser inserido o valor inverso na célula respectiva da matriz. A Tabela 3.3 apresenta um exemplo simplificado da matriz utilizada no método de Saaty.

Tabela 3.3. Exemplo simplificado da matriz para o método de Saaty

	Critério A	Critério B	Critério C	Critério D
Critério A	1	3	5	8
Critério B	1/3	1	4	6
Critério C	1/5	1/4	1	7
Critério D	1/8	1/6	1/7	1

Para a matriz apresentada na Tabela 3.3, observa-se que todos os critérios localizados nas linhas foram mais importantes do que os critérios nas colunas. Sendo assim, lê-se que o critério A é 3 vezes mais importante do que o critério B, por exemplo. Para os valores inversos, lê-se que o critério C é 5 vezes menos importante do que o critério A, por exemplo. No software STR, os valores inversos são apresentados com números decimais.

Considerando possíveis dificuldades de decisão de níveis de importância diante dos múltiplos critérios e sua importância, o software realiza ainda a avaliação de possíveis inconsistências, sendo realizados cálculos recomendados por Saaty (1991). Uma maneira de avaliar o grau de consistência é através do cálculo da Razão da Consistência (em inglês, *Consistency Ratio* – CR), que permite avaliar a inconsistência em função da ordem da matriz. A Razão da Consistência é calculada a partir da relação entre o Índice de Consistência (em inglês, *Consistency Index* – CI) e Índice Randômico (em inglês, *Random*

Index – RI). Se o valor de CR for inferior a 0,1, então o grau de consistência é satisfatório, porém caso o CR seja superior a 0,1, é apontado inconsistência na matriz.

Seguindo o exemplo apresentado na Tabela 3.3, é possível interpretar que se A é 3 vezes mais importante do que B, e A é 5 vezes mais importante do que C, então A = 3B e A = 5C. Portanto, B/C = 5/3, ou seja, o critério B é mais importante do que o critério C. Sendo assim, para garantir a consistência da matriz, o valor inserido na posição (B,C) deve ser igual ou maior do que 1, para representar uma importância maior. Caso contrário, isto é, caso o valor inserido seja menor do que 1, então a matriz é inconsistente.

O Método de Saaty é recomendado para casos mais complexos, onde existem diversos critérios relevantes para a área, por facilitar a comparação par a par. Nesse método, está incluso ao cálculo dos pesos relativos um ajuste matemático, que permite trazer mais consistência para a avaliação e desta forma gerar resultados de classificação mais precisos. A avaliação pelo Método de Saaty, entretanto, pode ser mais demorada e exigir mais do julgamento técnico do usuário. A matriz de Saaty do STR está localizada na parte direita da interface do simulador e pode ser observada na Figura 3.8.

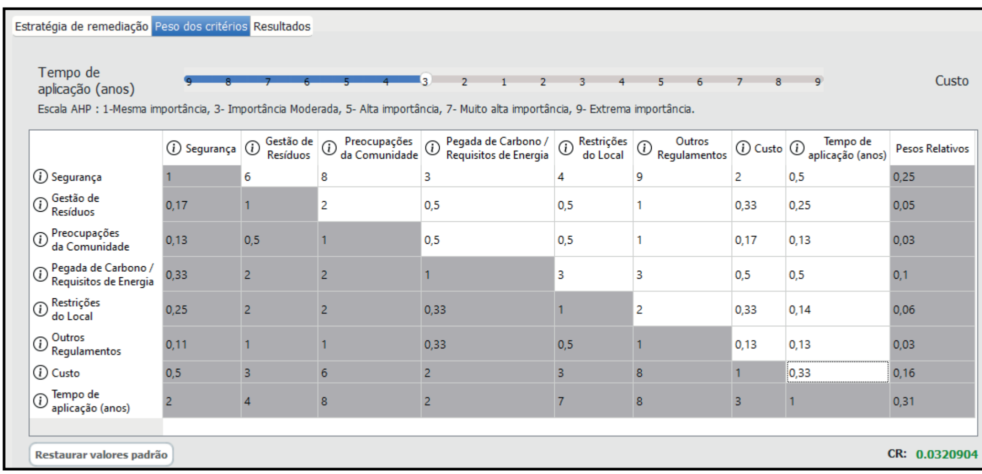


Figura 3.8. Exemplo da atribuição de pesos com a Matriz de Saaty.

- **Método dos Pesos Absolutos**

Consiste em definir um “peso absoluto” para cada um dos critérios, atribuindo um número maior para o critério de maior relevância. A partir do peso absoluto inserido pelo usuário, é calculado o peso relativo de cada critério. Nesse método, é importante a definição de uma escala de pesos pelo próprio usuário, para que os valores atribuídos tenham coerência entre si e conduzam para uma seleção mais assertiva. A Tabela 3.4 apresenta um exemplo de escala de importância que pode ser utilizada nesse método.

Tabela 3.4. Exemplo de escala de importância para o método dos Pesos Absolutos

10	Máxima
8	Alta
5	Média
2	Baixa
0	Nula

Recomenda-se a utilização do Método dos Pesos Absolutos em situações que existam poucos critérios relevantes para a tomada de decisão, de acordo com o modelo conceitual da área. Ou seja, é indicado para casos mais simples, em que é possível identificar quais critérios são mais relevantes para avaliação e atribuir um peso maior a eles de forma mais direta. É possível também aplicar um peso igual a 0 (zero) para os critérios em que não se deseja levar em consideração na avaliação. Esse método consiste em uma análise mais simplificada e rápida da importância dos critérios, portanto, pode gerar uma classificação não tão refinada quando aplicada a casos mais complexos. Para inserir os pesos basta acessar a parte direita da interface do simulador (Figura 3.9).

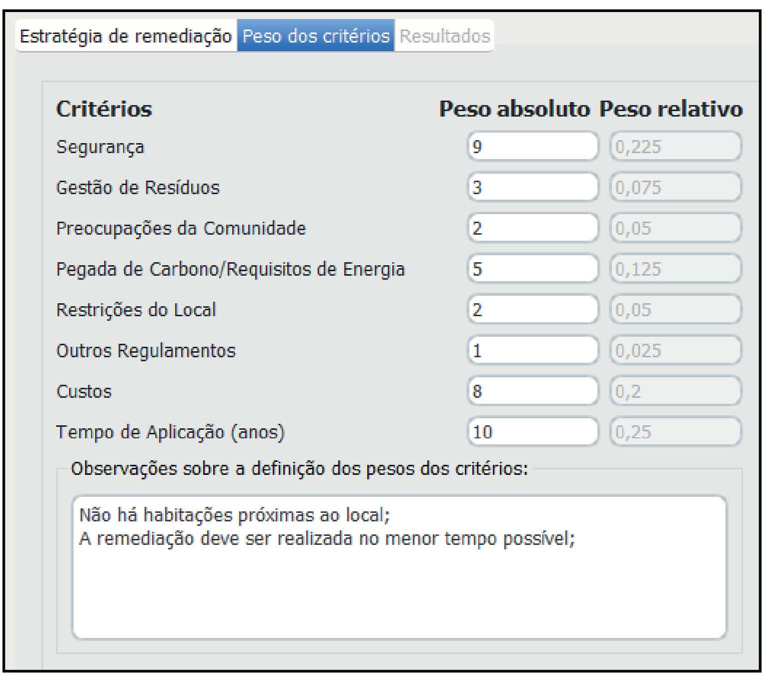


Figura 3.9. Exemplo de atribuição de pesos com o Método dos Pesos Absolutos.

3.7 Em quais cenários é recomendado aplicar as técnicas ANM e NSZD?

As técnicas de Atenuação Natural Monitorada (ANM) e Depleção Natural da Zona da Fonte (em inglês, *Natural Source Zone Depletion* – NSZD) são tecnologias em que os contaminantes são remediados por processos físico-químicos e biológicos, como a biodegradação e volatilização, não havendo intervenção humana. Para essas técnicas, são instalados poços de monitoramento a fim de acompanhar e analisar a evolução da remediação, bem como as concentrações dos contaminantes, além das características do solo e da água subterrânea. Por ocorrerem através de processos naturais, a duração dessas tecnologias é longa, sendo necessário anos e até décadas para a remediação completa dos contaminantes. De modo geral, ambas as técnicas podem ser empregadas nos seguintes casos (ASTM, 2015):

1. Única ação corretiva em locais onde ameaças à saúde humana, à segurança ou ao meio ambiente não existem ou foram mitigadas e onde o impacto das substâncias químicas de interesse (SQI) aos receptores seja improvável;

2. Uma fase subsequente de remediação após outra ação corretiva ter reduzido de maneira suficiente as concentrações ou massa na área da fonte, tornando os impactos da pluma aos receptores improváveis; e

3. Parte de um plano de remediação com multicomponentes (encadeamento de técnicas).

A ANM é uma tecnologia aplicável na fase dissolvida, abrangendo a estratégia de remediação da fase dissolvida e, portanto, é utilizada apenas na zona saturada. Para implementar a ANM como estratégia de remediação é necessário demonstrar que as SQI estão sendo degradadas a uma taxa protetiva à saúde humana. Para isso, a ASTM (2015) sugere a demonstração da ocorrência de atenuação natural na área contaminada através de linhas de evidência primária, secundária e opcionais, que abrangem:

1. Linhas de evidência primária: incluem dados que auxiliam a definir se a pluma está diminuindo, estável ou expandindo. Quando há dados históricos suficientes, as linhas de evidência primária normalmente são eficazes para demonstrar a evolução da remediação. Caso contrário, é necessário obter linhas de evidência secundária;

2. Linhas de evidência secundária: incluem indicadores geoquímicos da ocorrência de biodegradação e estimativas da taxa de atenuação natural. Para áreas onde as investigações foram iniciadas recentemente, é possível complementar as linhas de evidência primária medindo indicadores de biodegradação, pois este é o processo de maior contribuição para a atenuação natural de contaminantes. Dentre os indicadores de biodegradação incluem-se oxigênio dissolvido, temperatura, pH, nitrato e sulfato; e

3. Linhas de evidência opcionais: utilizadas para interpretar com mais rigor os dados obtidos nas linhas de evidência secundária, principalmente se as linhas de evidência anteriores forem inconclusivas. As linhas opcionais incluem a modelagem

do transporte de solutos, estimativas de capacidade assimilativa e estudos microbiológicos.

Já a NSZD é uma tecnologia direcionada para as fases livre e residual do LNAPL, atuando na mudança de fase do LNAPL como estratégia prioritária e na remoção de massa como estratégia secundária. É uma técnica utilizada estritamente para a zona da fonte de contaminação, podendo acontecer nas zonas saturada e insaturada. De modo geral, pode ser empregada com as seguintes condições (FRTR, 2020):

1. O LNAPL remanescente e os constituintes da fase dissolvida não representam risco para a saúde humana e o meio ambiente;
2. A atenuação natural da pluma de fase dissolvida está ocorrendo e é esperado que a atenuação continue acontecendo;
3. A extensão da área da pluma do LNAPL é estável ou está diminuindo; e
4. A extensão da pluma dissolvida é estável ou está diminuindo.

Portanto, ambas as técnicas são recomendadas para os casos em que a contaminação não representa risco à saúde humana e ao meio ambiente. Além disso, podem ser aplicadas no encadeamento de tecnologias, sendo utilizadas quando as concentrações de contaminantes já foram substancialmente reduzidas por meio de outras técnicas, considerando seu longo tempo de aplicação. Tendo em vista essas condições, a ANM é empregada na pluma dissolvida na zona saturada e a NSZD é empregada nas fases livre e residual para remoção de massa nas zonas saturada e insaturada.

3.8 Como é feita a classificação das tecnologias?

A classificação das tecnologias é realizada a partir dos pesos atribuídos aos critérios qualitativos nas etapas “Revisão do banco de dados” e “Peso dos critérios”. Tais critérios incluem a segurança da técnica, a gestão de resíduos, preocupações da comunidade, entre outros, apresentados no Item 2. Na etapa de “Revisão do banco de dados”, podem ser atribuídos os seguintes níveis apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Níveis dos critérios qualitativos

Escala	Nível
Muito baixo	0
Baixo	1
Baixo a Moderado	2
Moderado	3
Moderado a Alto	4
Alto	5

Os níveis apresentados na Tabela 3.5 correspondem à sensibilidade do critério em relação a determinada técnica. Isto é, o esforço exigido para que certa técnica seja executada. Sendo assim, quanto mais alto for o nível, maior a sensibilidade da técnica ao respectivo critério e, portanto, maior será o esforço necessário. Dessa forma, um maior nível acarreta em menor vantagem a um critério específico. Por exemplo, ao atribuir “Alto” para o critério “Custo” em determinada técnica, tem-se que o nível de esforço em termos de custos para execução da técnica é alto, o que provoca desvantagem na classificação geral.

Para o critério “Tempo de Aplicação” há níveis diferentes dos demais critérios (Tabela 3.6), porém as interpretações se mantêm. Isto é, as técnicas que demandam maior tempo de aplicação representam um nível maior e, portanto, estarão em desvantagem na classificação quando comparadas com técnicas de mais rápida duração.

Tabela 3.6. Níveis do critério “Tempo de Aplicação”

Escala	Nível
Menor que 1	0
De 1 a 3	1
De 2 a 5	2
De 5 a 10	3
Maior que 10	4

Tendo em vista que, para os critérios qualitativos, quanto maior for sua escala, maior será sua desvantagem, tal valor é subtraído do peso relativo calculado, tanto no Método dos Pesos Absolutos quanto no Método de Saaty. Além de ser subtraído, o valor é multiplicado pelo nível correspondente da escala selecionada e dividido pela quantidade de níveis que o critério possui. Isto é, ao realizar o cálculo do critério “Tempo de Aplicação”, o valor é dividido por 5, pois há 5 níveis de classificação. Para os demais critérios, o valor é dividido por 6, visto que há 6 níveis de classificação. A pontuação do critério é apresentada na Equação 1. A pontuação final da técnica é a soma das pontuações de todos os critérios.

$$Pontuação\ do\ critério = Peso\ relativo - \left[\left(\frac{Peso\ relativo}{6}\right) \times Nível\right] \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

Peso relativo: peso calculado na etapa “Peso dos critérios” pelo Método de Saaty ou Método dos Pesos Absolutos; e

Nível: nível atribuído a cada critério na etapa “Revisão do banco de dados”.

Considerando que o STR utiliza dois métodos para atribuir pesos aos critérios, o Método de Saaty e o Método dos Pesos Absolutos, os cálculos realizados para definir os pesos relativos de cada critério são diferentes e são apresentados a seguir.

- **Método de Saaty**

Ao preencher a matriz de Saaty, o peso relativo dos critérios é calculado em duas etapas: inicialmente é determinado o peso estatístico das células a cada coluna e, em seguida, é calculado o peso relativo a cada linha, conforme a Equação 2 e Equação 3 (SAATY, 1991).

$$Peso\ estatístico = \frac{Peso\ absoluto\ do\ critério}{\sum Pesos\ absolutos\ da\ coluna} \quad \text{Equação 2}$$

$$Peso\ relativo = \frac{\sum Pesos\ estatísticos\ da\ linha}{Quantidade\ de\ critérios} \quad \text{Equação 3}$$

- **Método dos Pesos Absolutos**

Ao inserir um peso absoluto aos critérios, conforme escala selecionada pelo usuário, o peso relativo respectivo é calculado seguindo a Equação 4.

$$Peso\ relativo = \frac{Peso\ absoluto\ do\ critério}{\sum Pesos\ absolutos} \quad \text{Equação 4}$$

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO (ASTM – E2531)

O exemplo apresentado a seguir baseou-se no apêndice X.6 da ASTM E2531 (2020) e foi utilizado como exemplo validador do STR. Primeiramente, é apresentada uma visão geral da construção do modelo conceitual da área contaminada em questão, com destaque aos parâmetros que servem como dados de entrada para o simulador. Em seguida, o STR é aplicado ao modelo conceitual a fim de classificar e selecionar as técnicas de remediação aplicáveis à área de interesse. A seguir serão apresentados os dados de entrada que foram levantados com base nas informações apresentadas pela ASTM, além dos resultados e justificativas para as tomadas de decisão durante a utilização do software.

4.1 Resumo do modelo conceitual

Em um antigo posto de abastecimento de caminhões nos Estados Unidos ocorreu um vazamento de diesel, conforme evidenciado pelos resultados da amostragem de solo e água subterrânea do local. A causa aparente da contaminação foi o enchimento excessivo de um antigo tanque subterrâneo de armazenamento, seguido da movimentação do óleo diesel no subsolo. A antiga instalação de combustível para caminhões operou de 1960 a 1995, quando encerrou suas atividades. O local permanece vago até o presente momento, porém existe o planejamento da construção de um prédio de escritórios a curto prazo, alterando o uso do espaço.

Nenhuma atividade de remediação foi realizada no local, exceto algumas remoções pontuais do solo impactado juntamente com a remoção do antigo tanque subterrâneo de armazenamento. Atualmente, o acesso ao local é permitido, porém, após a construção do edifício de escritórios se tornará restrito ou indisponível.

A área foi caracterizada com uma série de investigações padrões, incluindo a instalação de poços de monitoramento de água subterrânea e sondagens no solo. A localização dos poços de amostragem pode ser observada na Figura 4.1. Os resultados analíticos da amostragem do solo indicaram uma concentração máxima de hidrocarbonetos totais de petróleo na faixa do diesel (TPH_d) de 5.000 mg/kg nas proximidades da escavação do tanque. As concentrações máximas dos compostos de interesse na fase dissolvida e no solo são fornecidas na Tabela 4.1.

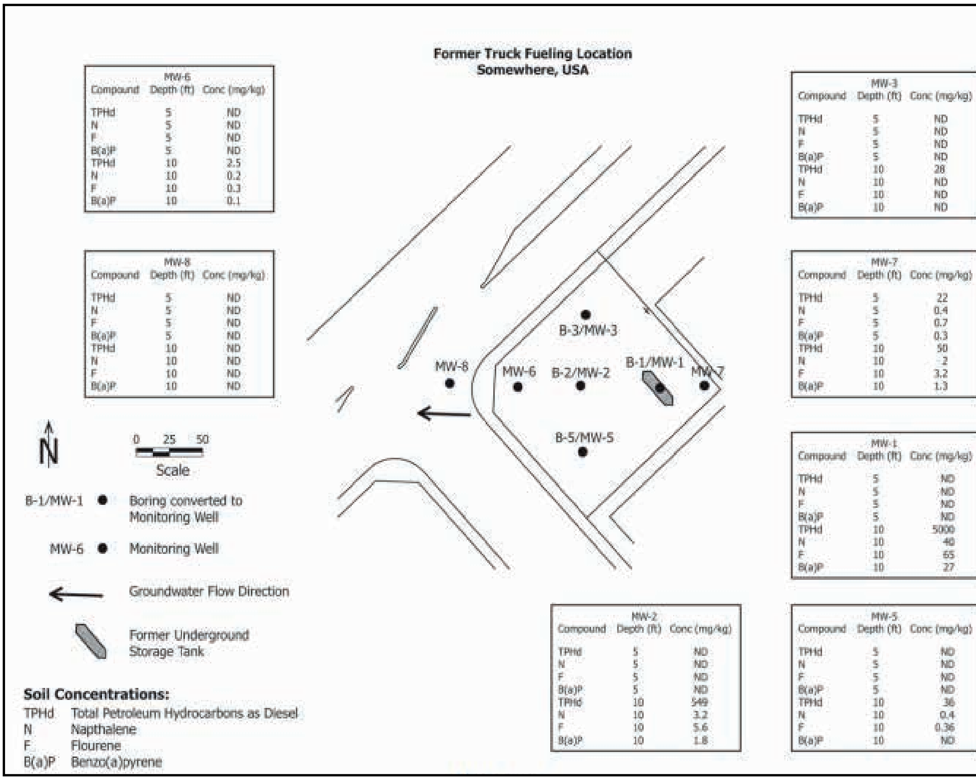


Figura 4.1. Localização do tanque e poços de monitoramento. Fonte: ASTM (2020).

Tabela 4.1. Concentração Máxima Histórica no Solo e na Água Subterrânea

Concentrações Máximas no Solo		
Componente	Profundidade (m)	Concentração (mg/kg)
TPH_d	3	5000
Naftaleno	3	40
Fluoreno	3	65
Benzo(a)pireno	3	27
Concentrações Máximas na Água Subterrânea		
Componente	-	Concentração (µg/L)
TPHd	-	12000
Naftaleno	-	1400
Fluoreno	-	18
Benzo(a)pireno	-	0.8

Fonte: ASTM (2020).

As concentrações da fase dissolvida ao longo do tempo mostram uma pluma dissolvida de água subterrânea estável a decrescente, além de uma massa decrescente das substâncias químicas de interesse nas águas subterrâneas, o que indica que os

mecanismos naturais de perda de massa estão ocorrendo (Figura 4.2). Não foi observado acúmulo de LNAPL nos poços ao longo do histórico de monitoramento.

O órgão regulador responsável não permite a utilização da água subterrânea local para abastecimento, devido ao alto conteúdo de sólidos dissolvidos totais. Não há nenhum presente ou futuro provável uso da água subterrânea como fonte potável para abastecimento. Além disso, a água subterrânea está a aproximadamente 3 m abaixo do solo superficial, com gradiente hidráulico de 0,005 direcionado para o oeste. Os dados da área e os registros regionais do Serviço Geológico dos Estados Unidos indicam que os níveis de água variam em uma faixa de cerca de 1,5 m, como resultado das variações sazonais na bacia de água subterrânea. A condutividade hidráulica do aquífero varia de 0,2 a 8 m/dia, com um valor médio geométrico de 1,1 m/dia. Os materiais do solo variam de areia a areia siltosa, com estratificação de continuidade variável.

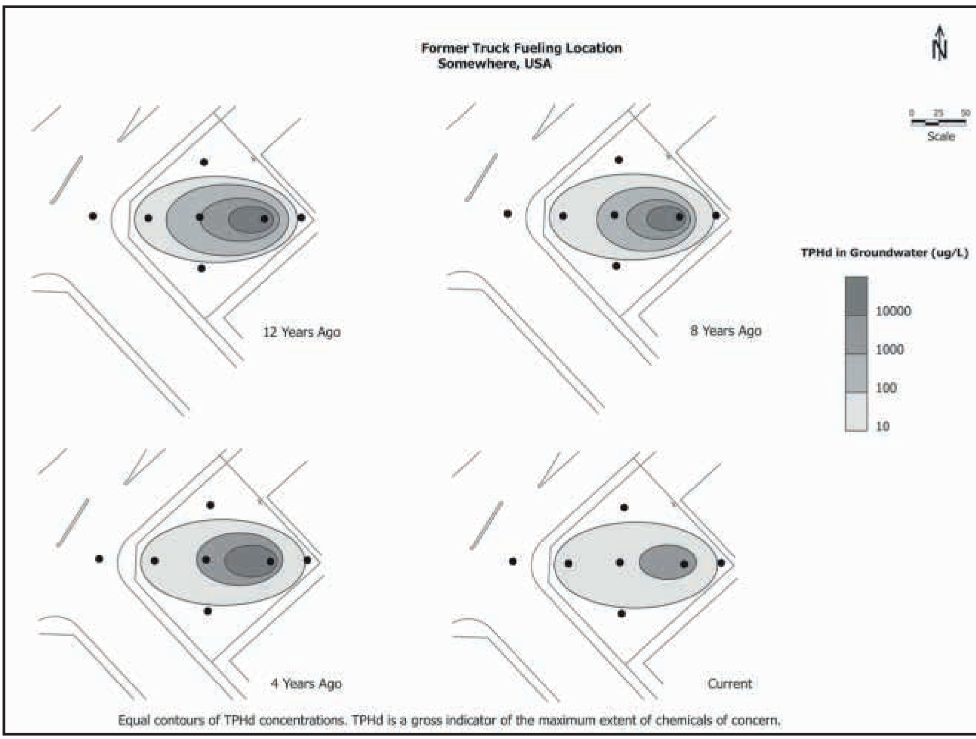


Figura 4.2. Concentrações da fase dissolvida ao longo do tempo. Fonte: ASTM (2020).

A avaliação de risco à saúde humana (ARSH) foi realizada considerando um cenário futuro com uso do solo comercial. Os resultados indicaram que as concentrações de exposição estão abaixo das Concentrações Máximas Aceitáveis calculadas. As rotas de exposição através da ingestão de água subterrânea e contato dérmico/ingestão de solo não se completam, visto que não há planos para captação da água do aquífero e os impactos residuais se encontram à três metros de profundidade, sendo improvável o contato direto

de trabalhadores ou visitantes no local. A partir do risco carcinogênico e não carcinogênico calculados, conclui-se que a área não apresenta risco aos receptores e, portanto, nenhuma ação de remediação é necessária com base na avaliação de riscos.

4.2 Aplicação do STR

A seguir é apresentado como foram inseridas as informações do modelo conceitual no STR e as justificativas das decisões tomadas.

4.2.1 Identificação da área de estudo

Essa etapa consiste na inserção de dados para a identificação da área a ser simulada, incluindo endereço, datum e a localização por link de geolocalização ou coordenadas geográficas. A Figura 4.3 apresenta a identificação da área de estudo da aplicação, contendo um endereço genérico.

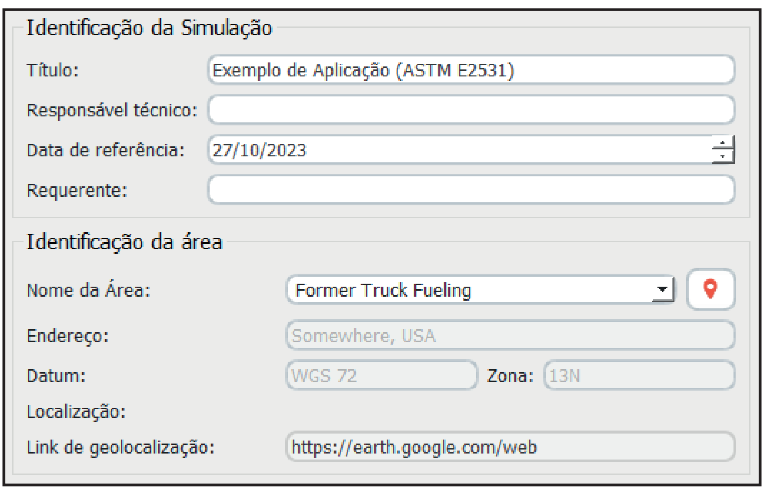


Figura 4.3. Identificação da área de estudo do exemplo de aplicação ASTM – E2531.

4.2.2 Definição do modelo conceitual

Essa etapa consiste na inserção dos dados de caracterização do local, que permitirão a seleção das técnicas de remediação aplicáveis à área, conforme a estratégia de remediação. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros de entrada utilizados para completar essa etapa e as respectivas justificativas.

Tabela 4.2. Definição do modelo conceitual e justificativas

Parâmetro	Valor/Descrição	Justificativa
Fase do LNAPL	Fase Residual	Não foi detectada fase livre nos poços. A fase dissolvida foi encontrada em concentrações abaixo das CMAs calculada e, portanto, não será considerada neste exemplo. Sendo assim, a fase residual será a única fase a ser considerada.
Estratégia de remediação	Remoção de massa	Visto que o LNAPL está presente na fase residual e, conforme o modelo conceitual elaborado, concluiu-se que a área não apresenta risco à saúde humana e não se pretende remediar a água subterrânea. Dessa forma, sabe-se que o objetivo dessa remediação será **eliminar fatores estéticos**. Com isso, ao analisar o fluxograma apresentado na interface do STR, o usuário tem duas opções para o objetivo de remediação: mudança de fase ou remoção de massa. As tecnologias de remoção de massa, em geral, são mais difundidas e têm implementação menos elaborada e mais baratas do que as tecnologias de mudança de fase. Dessa forma, recomenda-se que as tecnologias de mudança de fase sejam aplicadas quando as tecnologias de remoção de massa tenham atingido seu limite de recuperação ou não possam ser aplicadas. Sendo assim, para esse caso, foi selecionada a remoção de massa.
Condutividade hidráulica	1,1 m/d (0,00127 cm/s)	A condutividade hidráulica varia de 0,2 a 8 m/dia, sendo considerada, portanto, a média geométrica de 1,1 m/dia.
Heterogeneidade	Baixa	Como os materiais do solo variam de areia a areia siltosa, foi adotada heterogeneidade baixa, considerando a granulometria próxima de ambos os materiais.
Meio contaminado	Zona não saturada	Ambas as zonas (saturada e não saturada) estão contaminadas, porém não se pretende remediar a pluma dissolvida, já que não existem riscos à saúde humana, visto que não há uso da água subterrânea na região. A agência reguladora não exige nenhuma ação, pois foi demonstrado que a pluma está estável a decrescente. Portanto, a simulação levará em conta apenas a contaminação da zona não saturada.
Tipo de LNAPL	Médio (Diesel)	A faixa de TPH foi avaliada, sendo detectada uma concentração máxima de 5.000 mg/kg, que corresponde à faixa de diesel (TPH_d).
Profundidade da contaminação	Baixa (Z ≤ 4 m)	Considerando que a água subterrânea está à 3 m de profundidade do solo superficial e o nível d'água varia em 1,5 m, então o lençol freático encontra-se entre 1,5 e 4,5 m de profundidade. Dessa forma, a profundidade da contaminação para os dados de entrada será baixa.
Transmissividade	Não	Não foram realizados ensaios de transmissividade, entretanto, a fase residual é a fração de massa do LNAPL no meio poroso que permanece imóvel, sendo assim, não é transmissível.
Limite tolerável de risco à saúde humana adotado	Substâncias carcinogênicas [-]: 0,00001 Substâncias não carcinogênicas [-]: 1	O exemplo de estudo não apresentou quais limites toleráveis foram utilizados na Avaliação de Risco à Saúde Humana, desse modo, foram adotados os limites padrão do software, que obedecem à Resolução CONAMA n° 420.
Os riscos estão acima dos limites toleráveis?	Não	A Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH) indica riscos abaixo dos limites toleráveis para uso comercial.

A partir da definição do modelo conceitual, descrito na Tabela 4.2, os parâmetros foram inseridos no software (Figura 4.4 e Figura 4.5).

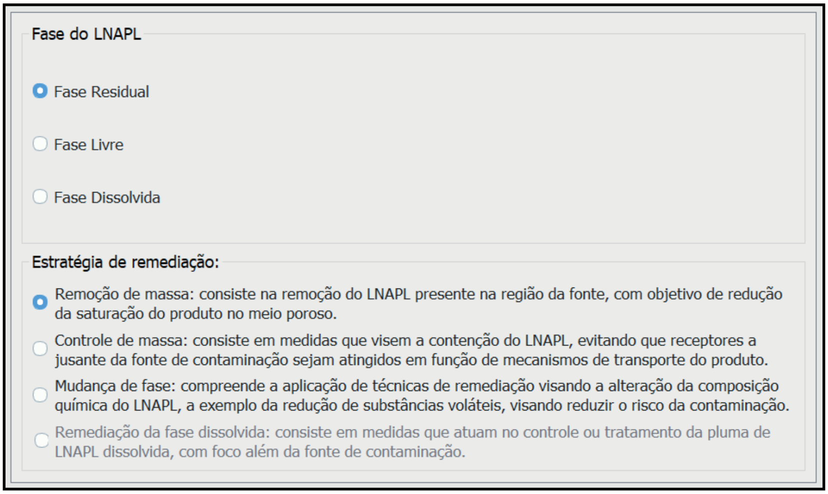


Figura 4.4. Dados de entrada do exemplo de aplicação ASTM – E2531 (Parte 1).

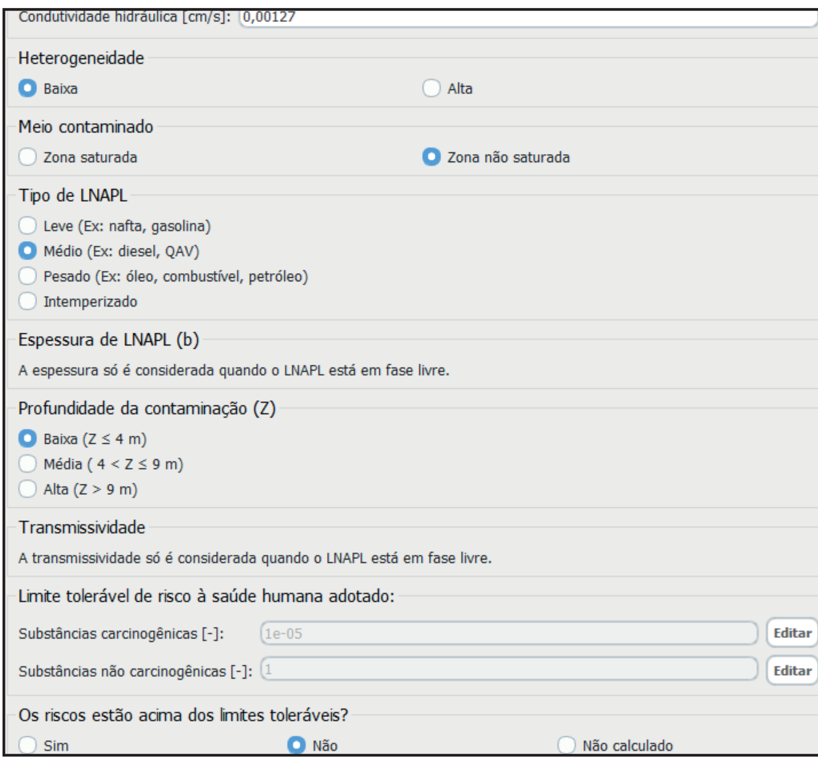


Figura 4.5. Dados de entrada do exemplo de aplicação ASTM – E2531 (Parte 2).

4.2.3 Revisão do banco de dados

Com base nos parâmetros inseridos na etapa de modelo conceitual, o STR selecionou as seguintes técnicas aplicáveis à área de estudo para a estratégia prioritária (Figura 4.6):

- Escavação e destinação final
- Fitorremediação

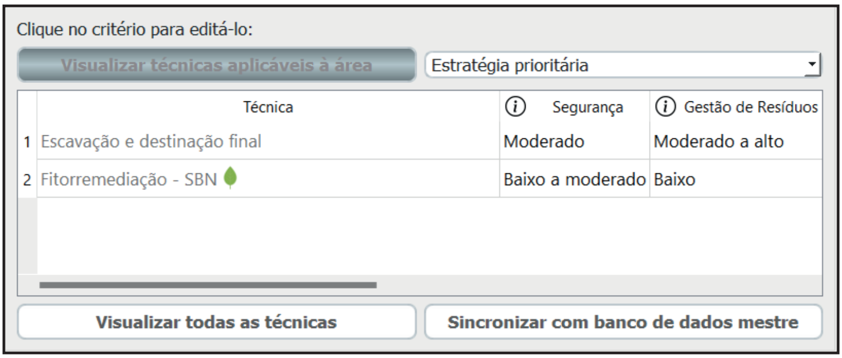


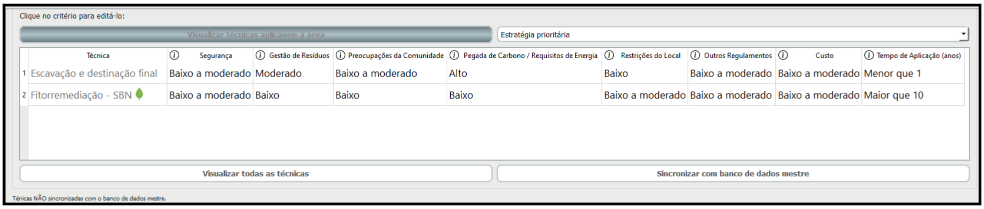
Figura 4.6. Técnicas aplicáveis à área a partir da estratégia prioritária.

Nessa etapa são apresentados alguns critérios qualitativos para cada técnica selecionada (como segurança, gestão de resíduos, custo etc.), que serão utilizados posteriormente para classificação das mesmas. É importante que o usuário revise esses dados para adequá-los às características particulares da área. Na Tabela 4.3 são apresentadas as avaliações feitas para cada critério e suas respectivas alterações.

Tabela 4.3 Revisão dos critérios qualitativos do banco de dados

Critério	Técnica	Peso original	Peso alterado	Justificativa
Segurança	Escavação	Moderado	Baixo a Moderado	Área de infraestrutura pouco densa. Sem potencial de interferência no trânsito. Sem risco associado à exposição de trabalhadores da construção. Problemas de segurança existentes são rotineiros para obras civis em geral
	Fitorremediação	Baixo a Moderado	Não alterado	-
Gestão de Resíduos	Escavação	Moderado a Alto	Moderado	Parte dos resíduos gerados será mitigada pelo reuso do solo como base de pavimentação rodoviária
	Fitorremediação	Baixo	Não alterado	-
Preocupações da comunidade	Escavação	Baixo a Moderado	Não alterado	-
	Fitorremediação	Baixo	Não alterado	-
Pegada de carbono/ requisitos de energia	Escavação	Alto	Não alterado	-
	Fitorremediação	Baixo	Não alterado	-
Restrições do local	Escavação	Alto	Baixo	Pretende-se construir um novo edifício em breve, portanto, quaisquer restrições que pudessem existir quanto ao uso de maquinário já serão eliminadas para realização da obra
	Fitorremediação	Baixo a Moderado	Não alterado	-
Outros regulamentos	Escavação	Baixo a Moderado	Não alterado	-
	Fitorremediação	Baixo a Moderado	Não alterado	-
Custo	Escavação	Alto	Baixo a moderado	Os custos com maquinário já estarão embutidos nos custos de escavação e movimentação de terra para construção do edifício, assim os custos específicos da remediação estão apenas relacionados à gestão dos resíduos e elementos adicionais do projeto
	Fitorremediação	Baixo a Moderado	Não alterado	-
Tempo de aplicação	Escavação	Menor que 1	Não alterado	-
	Fitorremediação	Maior que 10	Não alterado	-

A Figura 4.7 ilustra os critérios qualitativos para cada técnica apresentada como estratégia prioritária, considerando as mudanças nos critérios descritos na Tabela 4.3.

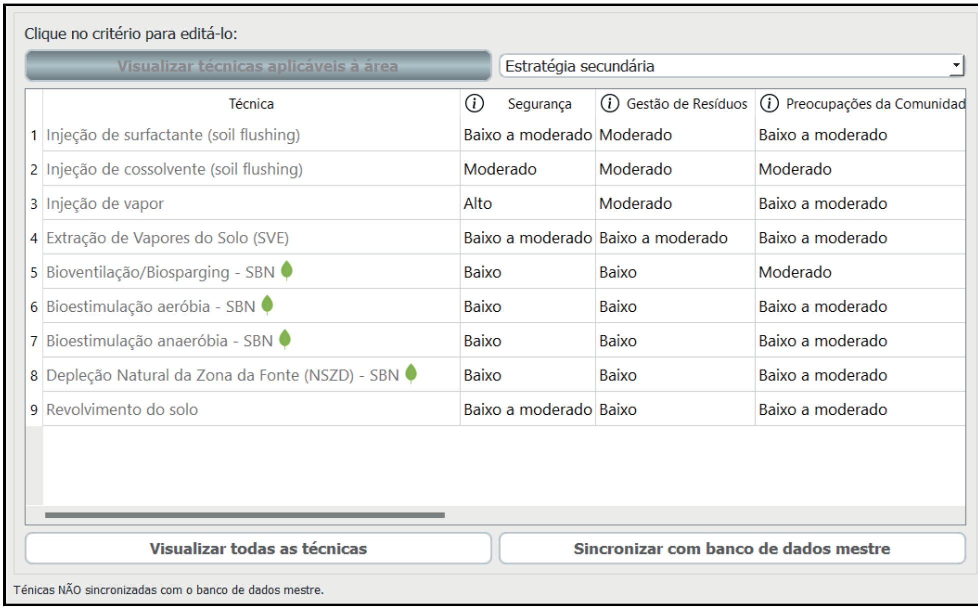


	Técnica	Segurança	Gestão de Resíduos	Preocupações da Comunidade	Pegada de Carbono / Requisitos de Energia	Restrições do Local	Outros Regulamentos	Custo	Tempo de Aplicação (anos)
1	Escavação e destinação final	Baixo a moderado	Moderado	Baixo a moderado	Alto	Baixo	Baixo a moderado	Baixo a moderado	Menor que 1
2	Fitorremediação - SBN	Baixo a moderado	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo a moderado	Baixo a moderado	Baixo a moderado	Maior que 10

Figura 4.7. Revisão dos critérios qualitativos do banco de dados para a estratégia prioritária.

Além das técnicas de estratégia prioritária selecionadas pelo STR, o software selecionou as tecnologias de estratégia secundária, que atuam na estratégia de remoção de massa, porém não prioritariamente ou somente sob condições específicas. Tais tecnologias são (Figura 4.8):

- Injeção de surfactante (*soil flushing*)
- Injeção de cossolvente (*soil flushing*)
- Injeção de vapor
- Extração de Vapores do Solo (SVE)
- Bioventilação/*Bioventing*
- Bioestimulação aeróbia
- Bioestimulação anaeróbia
- Depleção Natural da Zona da Fonte (NSZD)
- Revolvimento do solo



	Técnica	Segurança	Gestão de Resíduos	Preocupações da Comunidad
1	Injeção de surfactante (soil flushing)	Baixo a moderado	Moderado	Baixo a moderado
2	Injeção de cossolvente (soil flushing)	Moderado	Moderado	Moderado
3	Injeção de vapor	Alto	Moderado	Baixo a moderado
4	Extração de Vapores do Solo (SVE)	Baixo a moderado	Baixo a moderado	Baixo a moderado
5	Bioventilação/Biosparging - SBN	Baixo	Baixo	Moderado
6	Bioestimulação aeróbia - SBN	Baixo	Baixo	Baixo a moderado
7	Bioestimulação anaeróbia - SBN	Baixo	Baixo	Baixo a moderado
8	Depleção Natural da Zona da Fonte (NSZD) - SBN	Baixo	Baixo	Baixo a moderado
9	Revolvimento do solo	Baixo a moderado	Baixo	Baixo a moderado

Figura 4.8. Técnicas aplicáveis à área a partir da estratégia secundária.

4.2.4 Peso dos critérios

Nessa etapa, o usuário deve indicar quais critérios têm maior relevância de acordo com a sua avaliação, atribuindo diferentes pesos. O simulador dispõe de dois métodos para essa avaliação, o Método de Saaty, que possibilita a avaliação dos critérios aos pares e o método dos Pesos Absolutos, em que o usuário atribui pesos absolutos para cada critério e o simulador calcula os pesos relativos.

Nesse caso, optou-se por utilizar o método dos Pesos Absolutos, visto que o exemplo trouxe poucos critérios relevantes para a tomada de decisão, de acordo com o modelo conceitual da área. Em um caso mais complexo, no qual existem diversos critérios relevantes para a área, o método de Saaty seria mais recomendado, por facilitar a comparação par a par. Os pesos atribuídos para cada critério são apresentados na Figura 4.9. É importante ressaltar que diferentes analistas técnicos irão atribuir diferentes pesos a cada critério, visto que o julgamento é individual.

Para facilitar a determinação dos pesos, foi considerada uma escala de 0 a 10, com as seguintes atribuições:

- 0 = Importância Nula
- 2 = Baixa Importância
- 5 = Média Importância
- 8 = Alta Importância
- 10 = Máxima Importância

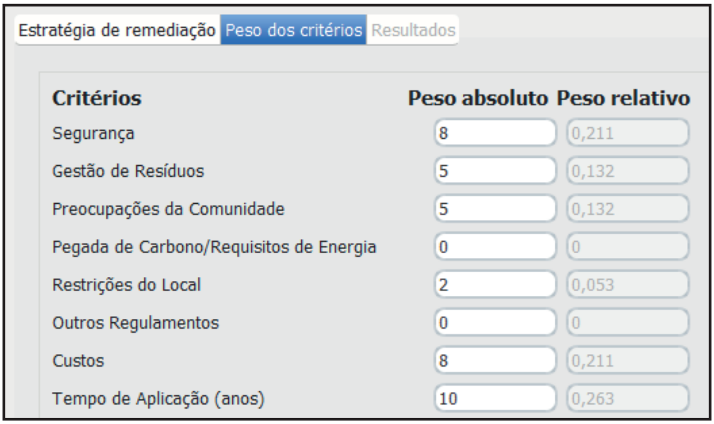


Figura 4.9. Peso dos critérios adotados no exemplo de aplicação ASTM – E2531.

A tomada de decisão se baseou nas seguintes considerações:

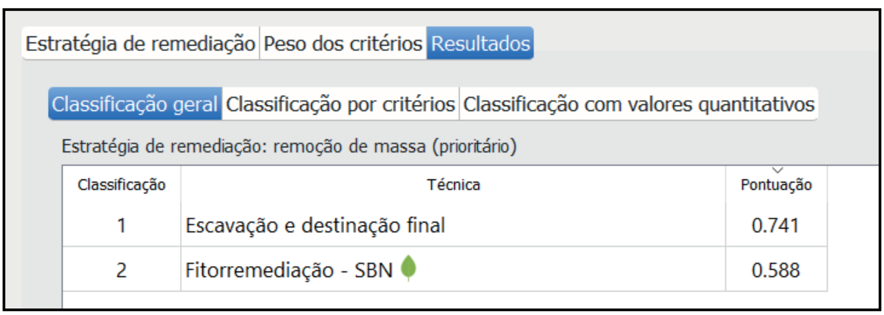
- O critério **Segurança** recebeu peso absoluto igual a 8, ou seja, possui alta importância. A escolha de técnicas com maior segurança implica em menores dificuldades de aplicação e gerenciamento.
- O critério **Gestão de Resíduos** recebeu peso absoluto igual a 5. Julgou-se esse critério como importância moderada por não haver nenhuma restrição adicional quanto à gestão e destinação final de resíduos na área, porém é um fator importante pelo fato de gerar maiores esforços para aplicação e gerenciamento da técnica.
- O critério **Preocupações da Comunidade** foi considerado como média importância (peso igual a 5), tendo em vista as possíveis preocupações expressas pela comunidade local.
- O critério **Pegada de Carbono** recebeu peso absoluto igual a 0, visto que o exemplo não apresenta muitas informações a respeito da disponibilidade energética do local e/ou outras restrições.
- O critério **Restrições do Local** recebeu peso absoluto igual a 2, ou seja, possui baixa importância, considerando que haverá a construção de um edifício após a remediação e, portanto, o local não apresenta grandes restrições.
- Para o critério **Outros Regulamentos** foi atribuído peso absoluto igual a 0, ou seja, este critério não tem nenhuma importância para seleção das técnicas de remediação e não será levado em consideração para avaliação dos resultados, visto que não existem outros regulamentos que poderiam impedir a aplicação das técnicas selecionadas.
- O critério **Custos** recebeu peso absoluto igual a 8, ou seja, possui importância alta. Entende-se que a relação custo-benefício é essencial para uma boa avaliação das técnicas.

- O critério **Tempo desejável de aplicação** recebeu peso absoluto igual a 10, ou seja, possui máxima importância, visto que se pretende construir um novo edifício em breve. Desse modo é necessário que seja aplicada uma técnica com tempo de aplicação curto. Por esse motivo, este critério recebeu o maior peso entre os demais.

4.2.5 Classificação das técnicas selecionadas

Ao clicar em “Calcular os resultados” é apresentada a classificação das técnicas e suas respectivas pontuações, com base nos pesos atribuídos aos critérios na etapa anterior. O resultado da simulação pode ser observado na Figura 4.10 e na Figura 4.11.

A partir da pontuação obtida com o peso atribuído aos critérios, a técnica de escavação e destinação final mostrou-se a mais adequada para a situação. Considerando os pesos utilizados, a escavação superou a fitorremediação principalmente no critério de tempo de aplicação potencial, visto que este é um critério com alto peso e a escavação e destinação final é uma técnica que não requer um longo período de tempo para ser realizada.

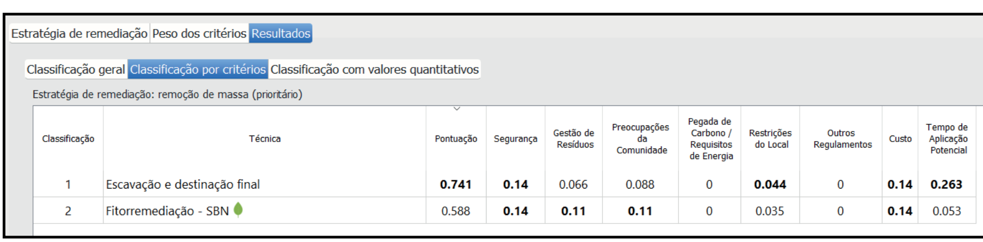

Estratégia de remediação | Peso dos critérios | Resultados

Classificação geral | Classificação por critérios | Classificação com valores quantitativos

Estratégia de remediação: remoção de massa (prioritário)

Classificação	Técnica	Pontuação
1	Escavação e destinação final	0.741
2	Fitorremediação - SBN	0.588

Figura 4.10. Classificação geral e pontuação das técnicas de remediação.


Estratégia de remediação | Peso dos critérios | Resultados

Classificação geral | Classificação por critérios | Classificação com valores quantitativos

Estratégia de remediação: remoção de massa (prioritário)

Classificação	Técnica	Pontuação	Segurança	Gestão de Resíduos	Preocupações da Comunidade	Pegada de Carbono / Requisitos de Energia	Restrições do Local	Outros Regulamentos	Custo	Tempo de Aplicação Potencial
1	Escavação e destinação final	**0.741**	**0.14**	0.066	0.088	0	**0.044**	0	**0.14**	**0.263**
2	Fitorremediação - SBN	0.588	**0.14**	**0.11**	**0.11**	0	0.035	0	**0.14**	0.053

Figura 4.11. Classificação por critério e pontuação das técnicas de remediação.

Ao clicar em “Visualizar técnicas de remediação com a estratégia de remoção de massa como ação secundária” é apresentada a classificação das técnicas de estratégia secundária e suas respectivas pontuações, como ilustra a Figura 4.12.

Ocultar técnicas de remediação com a estratégia remoção de massa como ação secundária

Estratégia de remediação: remoção de massa (secundário)

Classificação	Técnica	Pontuação
1	Bioestimulação aeróbia - SBN	0,82
2	Extração de Vapores do Solo (SVE)	0,649
3	Bioventilação/Biosparging - SBN	0,632
4	Revolvimento do solo	0,627
5	Bioestimulação anaeróbia - SBN	0,61
6	Depleção Natural da Zona da Fonte (NSZD) - SBN	0,61
7	Injeção de surfactante (soil flushing)	0,601
8	Injeção de cossolvente (soil flushing)	0,5
9	Injeção de vapor	0,478

Figura 4.12. Classificação geral e pontuação das técnicas de remediação de estratégia secundária.

4.2.6 Relatório final

O STR permite que a simulação seja exportada em formato *.pdf* e *.html* para um relatório final. Dessa forma, são compiladas as informações de projeto, tais como informações da área, dados de entrada sobre o meio físico e contaminante, bem como os critérios alterados e pesos atribuídos.

Além desse compilado de informações, o relatório aborda uma lista de técnicas não classificadas e o motivo que as desclassificou. Por exemplo, o relatório desse exemplo apresenta as técnicas "bombeamento e tratamento" (P&T) e "injeção de ar e extração de vapores do solo" (AS/SVE) como tecnologias desclassificadas, por serem técnicas indicadas para a zona saturada. O ANEXO A apresenta o relatório final gerado para o exemplo aqui discutido.

4.3 Conclusões

A aplicação do exemplo proposto pela ASTM E2531 (2020) no simulador STR, seguindo os passos e julgamentos propostos neste documento, apresentou como resultado a técnica "escavação e destinação final" em primeiro lugar na classificação. Ou seja, é a técnica aplicável que teria os maiores benefícios de acordo com os critérios definidos pelo usuário na simulação. Entretanto, levando em consideração apenas as características do meio contaminado, características do contaminante e objetivo de remediação selecionado, além da escavação, poderia ser aplicada a fitorremediação.

A ASTM E2531 traz em seu exemplo uma análise de custo-benefício. Foram avaliadas as técnicas de "bombeamento e tratamento", "injeção de ar e extração de vapores do solo" e "escavação". Primeiramente, foi realizada uma análise de aplicabilidade da técnica para as condições do local e posteriormente, uma análise de custo. A técnica que obteve a maior pontuação para a aplicabilidade e menor pontuação para custo foi a escolhida. As técnicas

de bombeamento e tratamento e injeção de ar e extração de vapores do solo tiveram notas iguais a 0 e 1 (em uma escala de 9 – valor máximo – e 0 – valor mínimo), respectivamente, no quesito de aplicabilidade. Ou seja, caso essas técnicas fossem aplicadas, não atingiriam os objetivos determinados. No simulador STR, essas técnicas não foram apresentadas como aplicáveis após a inserção dos dados da área de estudo, portanto, o resultado está coerente com a discussão da ASTM. De acordo com o relatório final gerado, as técnicas de "bombeamento e tratamento" e "injeção de ar e extração de vapores do solo" foram desclassificadas por não serem indicadas para a zona não saturada, além da tecnologia "bombeamento e tratamento" também não ser utilizada para a fase residual, sendo este o segundo motivo desclassificatório da técnica.

Por fim, a ASTM E2531 traz a escavação e destinação como a melhor opção para remediação da área. Essa técnica também obteve a melhor classificação nos resultados do simulador STR, com pontuação igual a 0,771. O software trouxe outra técnica aplicável (fitorremediação) que obteve pontuações próximas à técnica de escavação, portanto, também poderia ser viável de acordo com os critérios estabelecidos. Esta técnica, entretanto, não é discutida na ASTM E2531, não sendo possível comparar os resultados do simulador com a ASTM neste quesito.

A técnica fitorremediação é tecnicamente aplicável, conforme resultados do STR, considerando os parâmetros e critérios estabelecidos para a situação. Contudo, a fitorremediação é uma tecnologia que requer um tempo muito longo de atuação, muitas vezes maior do que 10 anos. De acordo com as características da área, deseja-se construir um edifício comercial a curto prazo, ou seja, não configuraria a técnica mais aplicável para o local dentre as demais. Por esse motivo, o STR atribuiu uma pontuação mais baixa para essa técnica.

De acordo com o STR, algumas técnicas foram selecionadas por possuírem a remoção de massa como estratégia secundária, como a bioestimulação aeróbia, extração de vapores do solo, bioventilação, revolvimento do solo, entre outras. As tecnologias selecionadas a partir da estratégia secundária, no entanto, não são discutidas na ASTM E2531. Sendo assim, não foi possível realizar a comparação de tal resultado.

É importante ressaltar que, por se tratar de um software de apoio à tomada de decisão, para uma mesma área, dependendo do julgamento de cada usuário, pode-se obter diferentes resultados. Salienta-se também que, as informações trazidas no apêndice X.6 da ASTM E2531, além de orientar sobre a construção do modelo conceitual, tem o intuito de argumentar sobre a escolha da escavação como melhor técnica de remediação para a área. Assim, a escolha dos pesos dos critérios e a revisão do banco de dados foi orientada nesse sentido.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *E2531-06: Standard Guide for Development of Conceptual Site Models and Remediation Strategies for Light Nonaqueous-Phase Liquids Released to the Subsurface.* West Conshohocken, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Guide for Remediation of Ground Water by Natural Attenuation at Petroleum Release Sites*. ASTM E1943-98 (Reapproved 2015), 2015.

GOVERNMENT OF CANADA. *Pollution Waste Management: Contaminated Areas*. 2023. Disponível em: https://www.canada.ca/en/services/environment/pollution-waste-management/contaminated-sites.html

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGY ROUNDTABLE (FRTR). *Technology Screening Matrix*. 2020. Disponível em: https://frtr.gov/matrix/

INTERSTATE TECHNOLOGY AND REGULATORY COUNCIL (ITRC). *Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies*. 2018. Disponível em: https://lnapl-3.itrcweb.org

SAATY, T. L. *Método de Análise Hierárquica*. Tradução: Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: McGraw-Hill Pub. Co., 1991.

Guia do Usuário

STR

Seleção de Técnicas de Remediação

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

PETROBRAS
anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
UFSC
rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE
Atena Editora
Ano 2024

Guia do Usuário

STR

Seleção de Técnicas de Remediação

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

PETROBRAS
anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
UFSC
rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE
Atena Editora
Ano 2024